

Liviu JALBĂ, Dumitru STANOMIR,
Octavian STĂNĂȘILĂ

FIZICĂ PENTRU NEPOȚI

- CARTE DE ÎNVĂȚĂTURĂ -

COLECȚIA ALMA MATER STUDIORUM

București, 2015

Fundația



Floarea Darurilor

Culegerea textului și tehnoredactarea

Luminița Cătănuș

Mădălina Florescu

*Tipărită la Regia Autonomă Monitorul Oficial
București, ROMÂNIA, în 500 exemplare.*

ISBN 978-973-0-19285-8

Volumul III

SALTUL SPRE FIZICA MODERNĂ. ELEMENTE DE FIZICĂ ATOMICĂ ȘI FIZICĂ NUCLEARĂ

CUPRINSUL VOLUMULUI al III-lea

PARTEA I – TEORIE ȘI EXEMPLE

CAPITOLUL 6: SALTUL SPRE FIZICA MODERNĂ

pag. 11

§1. ELEMENTE DE TEORIA RELATIVITĂȚII

RESTRÂNSE

pag. 12

§2. CONSTANTA h A LUI PLANCK ȘI EFECTUL

FOTOELECTRIC

pag. 31

§3. PREMISELE FONDATOARE ALE MECANICII

CUANTICE

pag. 43

CAPITOLUL 7: ELEMENTE DE FIZICĂ ATOMICĂ ȘI FIZICĂ NUCLEARĂ

pag. 61

§1. ATOMII, MĂRIMI CARACTERISTICE

pag. 62

§2. CELE 4 NUMERE CUANTICE ȘI PRINCIPIUL LUI

PAULI

pag. 71

§3. SPECTRE ATOMICE

pag. 76

§4. STRUCTURA NUCLEULUI ATOMIC

pag. 81

§5. INTERACȚIUNEA RADIAȚIEI NUCLEARE CU

DIVERSE SUBSTANȚE

pag. 93

§6. FISIUNEA NUCLEARĂ, FUZIUNEA NUCLEARĂ

pag. 97

§7. CLASIFICAREA PARTICULELOR ELEMENTARE

pag. 103

PARTEA a II-a

COMPLETĂRI, ÎNTREBĂRI ȘI RĂSPUNSURI

CAPITOLUL 6': SALTUL SPRE FIZICA MODERNĂ

pag. 111

**CAPITOLUL 7': ELEMENTE DE FIZICĂ ATOMICĂ ȘI
NUCLEARĂ**

pag. 139

MARI FIZICIENI AI LUMII

pag. 195

**CRONOLOGIA EVENIMENTELOR CRUCIALE ÎN
FIZICĂ**

pag. 203

Formule și tabele de mărimi fizice

pag. 211

Constante fundamentale și derivate

pag. 213

Bibliografie

pag. 211

Indice de nume și notații

pag. 217

PARTEA I – TEORIE ȘI EXEMPLE

CAPITOLUL 6 - SALTUL SPRE FIZICA MODERNĂ

Introducere

Până la 1900, capitolele consacrate ale Fizicii – Mecanica, Termodinamica, Electromagnetismul, Optica, își stabiliseră legile de bază și avuseseră deja interlegări și extinderi tehnologice, cu modificarea percepției asupra diverselor porțiuni ale realității.

Descoperirile științifice fuseseră „dizolvate” în invenții spectaculoase, mai ales în domeniul mașinilor și motoarelor termice sau electrice, cu succese industriale și comerciale importante.

Dacă până atunci doar constructorii de drumuri și poduri se numeau ingineri, domeniul ingineriei s-a extins cuprinzând Mecanica, Electrotehnica, Metalurgia, Electronica etc.

În același timp, existau mai multe probleme teoretice care nu aveau răspuns sau care aveau interpretări contradictorii (de exemplu, relativ la structura atomică a materiei, la efectul fotoelectric, zborul cu avioanele sau avalanșa de întrebări legate de undele electromagnetice). De asemenea, se realizaseră experimente neelucidate, cele mai multe legate de domenii ascunse simțurilor directe. Lumea științifică se afla în mare agitație, mai ales că și matematicienii intraseră într-o „criză a fundamentelor”, plină de paradoxuri.

În acest volum, prezentăm câteva subiecte teoretice importante, care nu pot fi tratate „en passant” și fără de care nu se

pot înțelege marile succese științifice și tehnice ale secolului al XX-lea. Printre acestea, menționăm Teoria relativității restrânse, Efectul fotoelectric, Radioactivitatea și Preliminariile mecanicii cuantice. Fizica modernă începe cu înțelegerea structurii cărămizilor materiei – molecule, atomi, particule elementare deci o lume în care sunt absolut necesare gândirea abstractă, experimentele mentale, deschiderea interdisciplinară și, nu în ultimul rând, un aparat matematic corespunzător.

§1. ELEMENTE DE TEORIA RELATIVITĂȚII RESTRÂNSE

1.1. Relativitatea Galilei – Newton

Teoria relativității restrânse (pe scurt, TRR) a fost prezentată de Albert Einstein într-un memoriu din 1905. În esență, el studia măsurarea timpului și lungimilor, realizată de doi observatori de tip galileian, deci care se **deplasau cu viteză constantă a unuia relativ la celălalt**. După alți 10 ani, tot Einstein este cel care a descoperit Teoria relativității generale (TRG), care lua în considerare cazul când deplasarea avea loc cu **acelerație**, incluzând în discuție și gravitația.

Primul pas în studiul mișcărilor (transformărilor), unde spațiul și timpul trebuie considerate în mod unitar, îl constituie introducerea celei de-a patra dimensiuni.

Definiție: Se numește **eveniment punctual spațio-temporal** relativ la un reper ortonormal $(R) \equiv Oxyz$ (sau „**flash**” relativ la (R)) orice 4-uplu $e = (x, y, z, t) \in \mathbb{R}^4$, unde x, y, z sunt coordonatele poziției aceluși eveniment, iar t este momentul la care aceste coordonate au fost măsurate.

Dacă $e_1=(x_1,y_1,z_1,t_1)$ este un alt flash, atunci e și e_1 se numesc **fizic conectabile**, dacă este posibil de trimis un semnal de la e la e_1 sau invers. Deoarece viteza luminii c nu poate fi depășită, atunci distanța dintre punctele $M(x,y,z)$ și $M_1=(x_1,y_1,z_1)$ este cel mult egală cu $c \cdot |t - t_1|$ (adică distanța parcursă de un semnal luminos între momentele t și t_1); așadar, e și e_1 sunt fizic conectabile dacă și numai dacă are loc inegalitatea:

$$\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2+(z-z_1)^2} \leq c \cdot |t - t_1|. \quad (1)$$

Considerând flash-ul nul $0 \in \mathbb{R}^4$ („aici și acum”) care are loc în originea reperului (R) și la momentul $t=0$, rezultă că e este fizic conectabil cu 0 dacă și numai dacă $\sqrt{x^2+y^2+z^2} \leq c \cdot |t|$, adică:

$$x^2+y^2+z^2 - c^2 t^2 \leq 0. \quad (2)$$

Definiție:

Mulțimea $C=\{(x,y,z,t) \in \mathbb{R}^4 \mid x^2+y^2+z^2 - c^2 t^2 \leq 0 \text{ și } t \geq 0\}$ se numește **conul viitorului** (sau echivalent, **conul luminii**).

Această mulțime nu poate fi vizualizată. Se face convenția de a renunța la coordonatele y, z și de a considera drept „con al viitorului” mulțimea:

$$C_+=\{(x,t) \in \mathbb{R}^2 \mid x^2 - c^2 t^2 \leq 0, t \geq 0\};$$

aceasta are reprezentarea din figura 6.1.

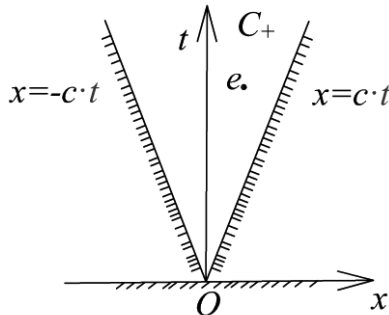


Fig. 6.1

Evenimentele $e \in C_+$ sunt fizic conectabile cu 0, iar cele din regiunea hașurată, nu. Menționăm că pentru fiecare flash e (adică în fiecare punct al spațiului și la fiecare moment) există câte un con C_+ al viitorului cu vârful în e , care conține evenimentele e' fizic conectabile cu e (figura 6.2).

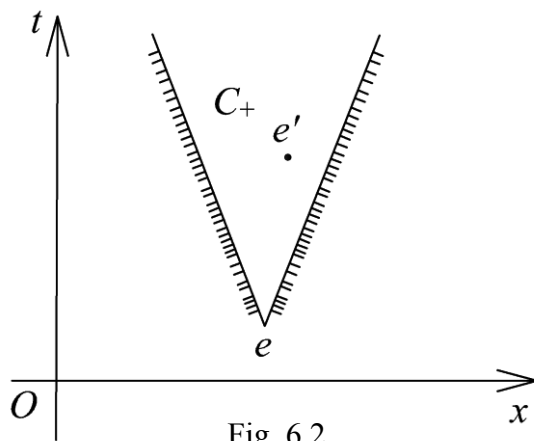


Fig. 6.2

Reținem că în Fizica modernă spațiul și timpul sunt studiate în mod unitar. Până la Newton, timpul nu era luat în considerare și se studiau doar fenomene statice sau staționare; în plus, se considera că orice două evenimente din Univers sunt instantaneu fizic conectabile, ceea ce este astăzi evident inacceptabil.

Definiție: Un reper $(R) \equiv Oxyz$ se numește **inerțial** dacă acolo are loc „legea inerției”. Corpurile foarte îndepărtate sunt considerate că se mișcă rectiliniu și uniform în raport cu (R) . Un alt reper, $(R') \equiv O'x'y'z'$ care se mișcă rectiliniu și uniform în raport cu (R) este de asemenea inerțial.

Exemplu: Șina de cale ferată este considerată un reper (referențial) inerțial în raport cu Pământul. De asemenea, Pământul este un reper inerțial în raport cu Soarele.

Cu convenția menționată, renunțăm la a considera explicit coordonatele y și z . Reperele se mai numesc și sisteme de coordonate, iar originile lor sunt interpretate ca observatori punctuali.

Presupunem că la momentele $t=t_1=0$, originile O și O_1 coincid și că axele Ox , Ox_1 au orientarea lui \vec{a} (figura 6.3).

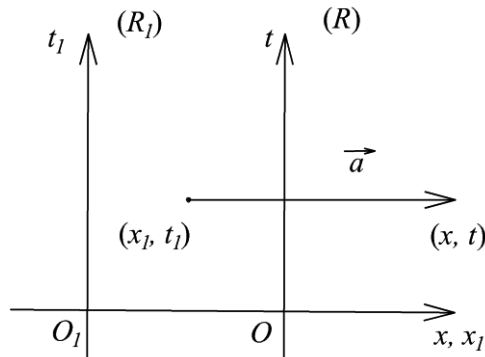


Fig. 6.3

Fiecărui flash (x_1, t_1) din reperul (R_1) îi corespunde flash-ul (x, t) din (R) unde $t=t_1$ și $x=x_1+a \cdot t$ (unde a este mărimea vectorului \vec{a}).

Aplicația:

$$F: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2, F(t_1, x_1) = (t_1, x_1 + a \cdot t_1), \quad (3)$$

se numește **transformare Galilei** între reperele R și R_1 .

Relațiile:

$$x = x_1 + at_1, t = t_1 \text{ (și } y = y_1, z = z_1) \quad (3')$$

se numesc **relațiile de transformare** (\equiv trecere) de la R_1 la R , iar $x_1 = x - at$, $t_1 = t$ ($y_1 = y, z_1 = z$) relațiile de trecere inversă, de la R la R_1 . La Newton, durata unui fenomen este aceeași în orice două repere inerțiale și, la fel, distanța între orice două flash-uri M_1, M_2 este invariantă, în sensul că este egală cu distanța dintre $F(M_1)$ și $F(M_2)$. Dacă un mobil are, pentru orice moment t , viteza scalară

$v_1(t)$ în reperul (R_1), atunci el va avea viteza $v(t)=v_1(t)+a$ în reperul (R) și pentru accelerații, rezultă că:

$$a(t)=v(t)'=v_1'(t)=a_1(t), \text{ deci } \underline{\text{accelerația este invariantă.}}$$

Conform legii a II-a a lui Newton, rezultă că forța $F=m \cdot a$ este de asemenea invariantă (dacă masa este invariantă).

Galilei a afirmat că legile Fizicii sunt aceleași pentru doi observatori aflați în repere (\equiv sisteme) inerțiale. Newton a demonstrat acest fapt pentru legile Mecanicii. Dar în mod neașteptat, pentru legile Electromagnetismului, s-a constatat că efectele mutuale ale sarcinilor electrice în mișcare depind de acele sarcini, iar doi observatori aflați în deplasare în repere diferite obțin rezultate diferite pentru măsurarea acelor efecte.

Einstein a arătat că este necesară introducerea axiomei că viteza c a luminii este aceeași pentru toți observatorii. Conform legii newtoniene de compunere (\equiv adunare) a vitezelor, lumina ar fi trebuit să aibă viteze diferite în raport cu două repere inerțiale diferite. Einstein a avut în vedere și experimentul fizicienilor americani Michelson și Morley, care au contrazis compunerea newtoniană a vitezelor în cazul în care una din viteze este viteza luminii (dacă $v > 0$ este o viteză, compunerea newtoniană $v+c$ nu poate fi realizată).

Notă: O întrebare al cărei răspuns nu este încă decis în Cosmologia actuală este dacă legile Fizicii aici pe Terra sunt sau nu aceleași cu legile de pe o planetă din alt sistem solar.

Înainte de a prezenta principiile relativității restrânse și pentru a incita curiozitatea, vom vedea modul cum Einstein a arătat că orologiile (\equiv ceasurile) aflate în mișcare întârzie (!), iar obiectele aflate în mișcare se scurtează (!) și duratele se amplifică odată cu creșterea vitezei. Ca atare, în raport cu un observator

terestru, un astronaut aflat în deplasare rapidă trăiește mai mult timp și în plus, nava sa cosmică este mai scurtă decât era înainte de plecarea de pe Pământ. În plus, evenimentele care sunt simultane pentru astronaut nu sunt la fel dacă sunt văzute de pe Pământ. Vom analiza riguros aceste lucruri, comparând un reper legat de Pământ și unul legat de nava cosmică (presupunând că reperele sunt inerțiale, ceea ce este rezonabil).

Deoarece conceptele de spațiu și timp sunt modificate pentru obiectele aflate în mișcare rapidă, sunt necesare reformulări ale legilor Mecanicii, de exemplu, dacă se dorește păstrarea legilor de conservare a energiei și a impulsului. Astfel, vom vedea că pentru un corp cu masa m și viteza v , energia sa cinetică relativistă se definește prin $E_c = \frac{mc^2}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}} - mc^2$.

De asemenea vom defini energia de repaus, $E_0 = mc^2$, celebra ecuație a lui Einstein. Tot ce am spus este doar o invitație pentru a merge mai departe.

1.2. Axiomele relativității restrânse și consecințe

Am văzut în Capitolul 1 că legile Mecanicii newtoniene se aplică doar măsurărilor efectuate în raport cu repere inițiale. Așadar, în absența oricăror forțe, un obiect rămâne în repaus sau în mișcare rectilinie uniformă.

Axiomele (≡principiile) relativității restrânse sunt următoarele două:

I „Toate legile Fizicii (nu doar ale Mecanicii) au aceeași formă în repere inerțiale”.

II „Viteza luminii în vid este aceeași, egală cu c , pentru toți observatorii aflați în repere inerțiale”.

Așa cum am mai spus, principiile nu se demonstrează!

După cum se vede, nu este presupusă existența unui timp universal, ca la Newton, și nici a unui observator (\equiv reper) privilegiat.

Exemple:

1) Două persoane (punctuale) care se deplasează cu aceeași viteză una în raport cu alta nu pot decide dacă ele sunt în mișcare sau în repaus; astfel, o persoană aflată într-un tren care se deplasează cu viteza constantă față de șina ferată poate spune, de asemenea, că șina este cea care se deplasează.

2) O persoană care se deplasează spre o sursă sonoră va observa o viteză de propagare a sunetului superioară celei măsurate de cineva aflat în repaus în raport cu aerul. Dar așa ceva nu se întâmplă în cazul luminii!

În 1900 se credea că există un mediu, numit „eterul”, în care lumina s-ar propaga cu viteza c , precum sunetul.

Dar experimentul lui Michelson–Morley și succesul TRR au arătat că eterul nu există.

a) Dilatarea timpului

Prima consecință a axiomelor TRR este aceea că dacă un orologiu este în mișcare în raport cu un observator aflat într-un sistem inerțial, observatorul va vedea orologiul mergând mai lent decât un orologiu aflat în repaus.

Considerăm într-un laborator un orologiu, asimilat cu o bară de lungime l , prevăzută la extremități cu o oglindă Ω și un detector foto F (figura 6.4). Un impuls luminos emis la extremitatea de jos a barei este reflectat de oglinda Ω la detectorul F aflat lângă sursa luminosă. Convenim că de câte ori detectorul

primește un impuls luminos, orologiul avansează cu o gradație și emite un alt impuls. Calculăm durata t între două gradații succesive ale orologiului, ținând cont că distanța parcursă de lumină este $2l$.

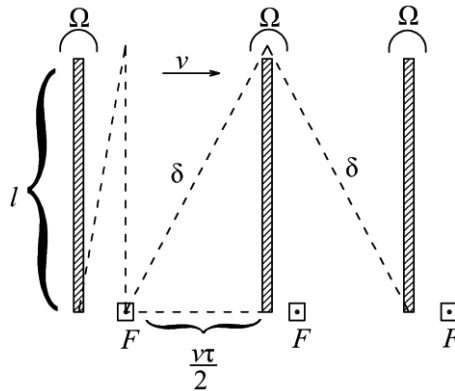


Fig. 6.4

Așadar, $c \cdot t = 2l$. Pe de altă parte, notând cu τ durata necesară luminii să revină la detectorul F pe drumul F–Ω–F, rezultă relația $c \cdot \tau = 2\delta$. Așadar, au loc relațiile:

$$l = \frac{1}{2} c \cdot t \text{ și } \delta = \frac{1}{2} c \cdot \tau \quad (4)$$

Din teorema lui Pitagora, rezultă că:

$$\delta^2 = l^2 + \left(\frac{1}{2} v \cdot \tau\right)^2, \text{ unde } v \text{ este viteza orologiului în raport cu}$$

laboratorul. Ca atare, $\frac{1}{4} c^2 \cdot \tau^2 = \frac{1}{4} c^2 \cdot t^2 + \frac{1}{4} v^2 \cdot \tau^2$, de unde:

$$(c^2 - v^2) \cdot \tau^2 = c^2 \cdot t^2. \text{ De aici rezultă că: } v < c \text{ și } \tau = \frac{c \cdot t}{\sqrt{c^2 - v^2}}.$$

Împărțind cu c și notând:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} \text{ (evident } \gamma \geq 1), \quad (5)$$

$$\text{deci, } \tau = \gamma \cdot t. \quad (6)$$

Sintagma „dilatarea timpului” se referă la inegalitatea $\tau \geq t$.

Notă: Mezonii μ sunt creați de razele cosmice la circa 10km altitudine față de solul terestru și îndeplinesc condițiile menționate (relativ la v și t). Deoarece $v \cdot \tau \cong 14,75 > 10$ km și faptul că s-a constatat existența acestor particule la solul terestru este o confirmare indirectă a teoriei relativității restrânse.

b) Con tracția lungimilor

Dacă un segment este parcurs cu viteza v în timpul t , în raport cu un observator fix, atunci lungimea lui va fi $l'=v \cdot t$. Dar pentru un observator care se deplasează tot cu viteza v , același segment va avea lungimea $l=v \cdot \tau$.

Dar conform formulei (6),

$$\tau = \gamma \cdot t \text{ deci } \frac{l}{l'} = \frac{v \cdot \tau}{v \cdot t} = \frac{\tau}{t} = \gamma.$$

Așadar, are loc formula:

$$l = \gamma \cdot l', \text{ cu } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}} > 1; \text{ deci}$$

$$l' = l \cdot \sqrt{1 - (v^2/c^2)}. \quad (7)$$

Sintagma „con tracția lungimilor” se referă la inegalitatea $l' \leq l$.

Exemplu: Un electron parcurge un segment de microscop electronic lung de 0,2 m cu viteza $v=0,4 c$. Care este lungimea segmentului respectiv măsurat într-un sistem de coordonate legat de electron?

Răspuns: În sistemul de coordonate unde electronul este fix, lungimea segmentului este $l=0,2$ m și ea se contractă la:

$$l' = l \cdot \sqrt{1 - (v^2/c^2)} = 0,2 \cdot \sqrt{1 - 0,4^2} \cong 0,18 \text{m}.$$

Notă: În microscopae electronice, electronii sunt deviați de diversele lentile; ca atare, efectele relativiste sunt considerabile în estimarea drumurilor parcurse de electroni.

c) Impuls și energie

În Capitolul 1, §4.1 am definit impulsul unui corp de masă m și viteză \vec{v} ca fiind produsul $\vec{p}=m \cdot \vec{v}$ și am demonstrat că o forță $\vec{F}=m \cdot \vec{a}$ este derivata impulsului, adică $\vec{F}=\vec{p}'(t)$ (conform relației (22) din Capitolul 1).

În §4.2 am demonstrat legea conservării impulsului, esențială pentru studiul ciocnirilor. Pentru corpuri având viteze foarte mari (de exemplu, pentru particule elementare), definiția anterioară trebuie modificată și anume:

Definiție: **Impulsul relativist** al unui corp cu masa m și viteza v este:

$$\vec{p} = \frac{m \cdot \vec{v}}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}} = \gamma \cdot m \cdot \vec{v} \quad (8)$$

Notă: Pentru valori $|x|$ mici, are loc formula aproximativă $(1+x)^\alpha \cong 1+\alpha x$, aplicată curent.

În particular,

$$\gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2} \cong 1 + \frac{v^2}{2c^2} \text{ deci conform (8),}$$

$$p \cong m \cdot v + \frac{mv^3}{2c^2} \text{ și, pentru valori mici ale lui } v, p \cong m \cdot v$$

(deoarece raportul $\frac{v^3}{2c^2}$ devine neglijabil).

Definind impulsul relativist prin (8), legea a II-a a lui Newton rămâne valabilă sub forma:

$\vec{F}=\vec{p}'(t)=m \cdot (\gamma \cdot \vec{v})' = m (\gamma' \cdot \vec{v} + \gamma \cdot \vec{a})$ și forța nu mai este coliniară cu accelerația.

Pe de altă parte, conform teoremei de variație a energiei cinetice (Capitolul 1, §3.4), dacă un corp este inițial în repaus,

atunci lucrul unei forțe pentru a-l pune în mișcare este egal cu energia cinetică finală.

Pentru lucrul elementar corespunzător, pe deplasarea $dl=v \cdot dt$ avem:

$$dL=F \cdot dl=p'(t) \cdot vdt=v \cdot dp=v \cdot d(\gamma mv) \stackrel{cf.(8)}{\cong} mv \cdot d(\gamma v)$$

și după calcule (care depășesc cadrul cărții), rezultă:

$$L=mc^2 \cdot (\gamma - 1).$$

Așadar, **energia cinetică relativistă** a unui corp cu masa m și viteza v este:

$$E_c=mc^2 \cdot (\gamma - 1)=mc^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}} - 1 \right) \quad (9)$$

Aplicând formula aproximativă:

$$\frac{1}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}} \cong 1 + \frac{v^2}{2c^2} \quad (\text{valabilă pentru viteze } v \text{ mici}),$$

regăsim formula $E_c=\frac{mv^2}{2}$ a energiei cinetice nerelativiste.

Exemplu: Dacă $v=0,8 \text{ } c$, să se determine raportul dintre energia cinetică relativistă și nerelativistă.

Răspuns: În acest caz, $\gamma = \frac{5}{3}$. Raportul cerut este egal cu $\frac{mc^2 \cdot (\gamma - 1)}{mv^2/2} = \frac{2c^2 \cdot (\gamma - 1)}{v^2} = \frac{2 \cdot 0,67}{0,64} \cong 2,08$.

Așadar, energia cinetică relativistă este de peste două ori mai mare. Ca atare, pentru a aduce un corp la o viteză mare, este necesar un lucru mult mai mare decât cel din mecanica newtoniană (\equiv nerelativistă).

Notă: Un obiect cu masa $m \neq 0$ nu poate atinge viteza luminii, deoarece atunci $\gamma \rightarrow \infty$ și conform (9) ar trebui făcut un lucru infinit!

Definiție: **Energia de repaus** a unui corp de masă m este $E_0 = m \cdot c^2$ și energia lui totală este:

$$E = E_c + E_0 \stackrel{cf.(9)}{\cong} mc^2 \cdot (\gamma - 1) + mc^2, \text{ deci} \\ E = \gamma \cdot m \cdot c^2. \quad (10)$$

Formula $E_0 = m \cdot c^2$ arată că masa și energia unui corp sunt mărimi esențialmente echivalente și că se pot converti una cu alta!

Această afirmație i-a aparținut lui Einstein în 1905 și practica a confirmat-o.

Vom vedea că în cadrul fisiunii, un nucleu de uraniu se scindează în două nuclee mai mici, a căror masă totală este un sfert din cea a nucleului inițial (restul sunt radiații), cu eliberarea unei cantități imense de energie. Așadar, masa este convertită în energie. Fuziunea nucleară degajă și mai multă energie (prin formarea unui nucleu mai mare din două mai mici); fuziunea este sursa de energie a stelelor. Fizicienii ne promit realizarea fuziunii pe Pământ și faimosul LHC din Elveția are tocmai acest obiectiv.

Notă: Formula $E_0 = m \cdot c^2$ nu se poate folosi direct. Ar însemna că o boabă de fasole de 10 g ar genera o energie imensă; anume: $E_0 = 10 \times 10^{-3} \times (3 \times 10^8)^2 \cong 9 \times 10^{14} \text{ J}$ și cum $1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$, ar rezulta că $E_0 \cong 2,5 \times 10^8 \text{ kWh}$, ceea ce contravine simțului comun!

În mod corect, variația masei și variația energiei de repaus sunt legate prin relația $\Delta E_0 = c^2 \cdot \Delta m$ și numai prin **variația** masei s-ar obține practic o variație de energie profitabilă (experimentul s-a făcut cu bomba atomică).

Trebuie adăugat că masa m_0 a unei particule în raport cu un reper R (numită **masa de repaus**) și masa aceleiași particule

deplasată cu viteza v în raport cu R se află în relația $m=\gamma \cdot m_0$ (deci $m > m_0$).

Din relațiile: $p=\gamma \cdot m \cdot v$ și $E=\gamma \cdot m \cdot c^2$ și ținând cont de faptul că $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}}$, rezultă relația:

$$E^2=p^2 \cdot c^2+m^2 \cdot c^4. \quad (11)$$

Dacă $m \neq 0$, atunci

$$E^2=m^2 \cdot c^4 \cdot \left(1+\frac{p^2}{m^2 \cdot c^2}\right), \text{ deci}$$

$$E = mc^2 \sqrt{1+\frac{p^2}{m^2 \cdot c^2}} \cong mc^2 \left(1+\frac{p^2}{2m^2 \cdot c^2}\right), \text{ adică}$$

$$E=m \cdot c^2+\frac{p^2}{2m}. \quad (12)$$

În cazul când $m=0$, așa cum este cazul luminii, din relația (11) rezultă $E=p \cdot c$, adică energia totală a unui foton, este produsul dintre impulsul fotonului și viteza luminii. Este interesant că această formulă a apărut și la Maxwell, cu 40 de ani mai înainte de Einstein, pentru impulsul transportat de o undă electromagnetică. Este și aceasta o indicație că TRR este compatibilă cu Electromagnetismul.

Există și alte consecințe ale axiomelor TRR, la care vom reveni după introducerea și studiul transformărilor lui Lorentz.

1.3. Transformările lui Lorentz

Am văzut că Mecanica newtoniană, bazată pe ideea timpului absolut, nu se poate aplica fenomenelor care se referă la viteze comparabile cu c , așa cum sunt undele electromagnetice și fenomenele optice. În plus, sincronizarea orologiilor în două repere inerțiale aflate în mișcare nu se poate realiza, deoarece nici un semnal nu poate fi transmis cu viteză infinită.

În Geometrie, se numesc transformări punctuale (\equiv mişcări) ale spațiului S , acele aplicații $F:S \rightarrow S$ care sunt bijective (\equiv au inverse) și care păstrează distanțele și unghiurile deci transformă paralelogramele în paralelograme. În cazul Geometriei euclidiene (pentru $S=\mathbb{R}^2$ sau \mathbb{R}^3), acestea sunt translațiile, rotațiile și simetriile, care transformă orice figură într-una congruentă cu ea.

În Fizica lui Galilei și Newton, nu există constrângeri privind timpul și viteza mișcărilor, neținând cont că viteza luminii nu poate fi depășită (anume, pentru orice viteză v , avem $v < c$).

Dar Fizica modernă a impus considerarea spațio-timpului $\mathbb{R}^4 = \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}$ pentru „flash”-uri și pentru reperele 4-dimensionale $(R) \equiv (Oxyz)$ și $R' \equiv (O', x', y', z', t')$ care se mișcă unul în raport cu celălalt, astfel încât legăturile între coordonatele respective să respecte axiomele TRR. Presupunând că în originea reperului (R) se află o sursă de lumină, ecuația frontului de undă S_t emis la momentul $t=0$ este ecuația sferei cu centrul în O și cu rază $c \cdot t$, adică:

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 \cdot t^2 \quad (13)$$

și în reperul (R') , ecuația frontului de undă corespunzător este

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = c'^2 \cdot t'^2 \quad (14)$$

și $(x, y, z) \in S_t \Leftrightarrow (x', y', z') \in S_{t'}$.

Se observă că în reperele (R) și (R') conurile viitorului definite în 1.1 se corespund. O transformare Galilei-Newton de tip $(3')$, adică $x' = x - at$, $y' = y$, $z' = z$, $t' = t$ ar conduce la relația:

$$(x - at)^2 + y^2 + z^2 = c^2 \cdot t^2,$$

care nu coincide cu relația $x^2 + y^2 + z^2 = c^2 \cdot t^2$ decât pentru $a=0$, inacceptabil.

Ca atare, fizicianul olandez Lorentz și-a pus problema de a găsi o altă transformare liniară:

$$F: \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R}^4, (x, y, z, t) \mapsto (x', y', z', t').$$

Folosind metoda coeficienților nedeterminați, el a presupus că $x'=ax+bt$, $y'=y$, $z'=z$ și $t'=mx+nt$ (cu $a, b, m, n \in \mathbb{R}$; $a>0, n \neq 0$). Dar pentru $x'=0$, avem $\frac{dx}{dt}=v$ (viteza) și pentru $x=0$, $\frac{dx'}{dt'}=-v$. Pentru $x'=0$, rezultă $ax+bt=0$ deci $adx+bdt=0$, adică $v=-\frac{b}{a}$. Similar, pentru $x=0$, rezultă $x'=bt$, $t'=nt$ deci $\frac{dx'}{dt'}=\frac{b}{n}=-v$ deci $v=-\frac{b}{n}$. Ca atare, rezultă $a=n$.

Înlocuind în ecuația (14), avem: $(ax+bt)^2+y^2+z^2=c^2(mx+at)^2$ și comparând cu (13), se obțin relațiile:

$$a^2-c^2m^2=1, 2ab-2c^2am=0, b^2-a^2c^2=-c^2.$$

Înlocuind $b=-a \cdot v$, rezultă relațiile

$$a^2-c^2m^2=1, -av=c^2m \text{ și } (c^2-v^2)a^2=c^2, \text{ de unde:}$$

$$a=\frac{c}{\sqrt{c^2-v^2}}, b=\frac{-c \cdot v}{\sqrt{c^2-v^2}}, m=-\frac{v}{c\sqrt{c^2-v^2}}, n=\frac{c}{\sqrt{c^2-v^2}}.$$

$$\text{Împărțind cu } c \text{ și înlocuind } \beta=\frac{v}{c}, \gamma=\frac{1}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}},$$

rezultă formulele explicite ale transformării Lorentz

$$x'=\gamma(x-\beta ct), y'=y, z'=z, t'=\gamma\left(t-\frac{\beta x}{c}\right). \quad (15)$$

Se poate arăta că transformarea inversă este:

$$x=\gamma(x'+\beta ct'), y=y', z=z', t=\gamma\left(t'+\frac{\beta x'}{c}\right). \quad (16)$$

Dacă $v \ll c$, atunci $\gamma \cong 1$ și $\beta \cdot c=v$ și formulele (15) (respectiv (16)) devin $x'=x-vt$, $t'=t$ (respectiv $x=x'+vt'$, $t=t'$), adică tocmai formulele (3') ale transformării Galilei–Newton.

Omițând variabilele y, z , transformarea Lorentz directă, în cazul vitezei v , este:

$$L_v: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2, (x, t) \mapsto (x', t') \text{ unde} \\ x' = \gamma(x - vt), t' = \gamma\left(-\frac{v}{c^2}x + t\right), \quad (17)$$

iar inversa ei este dată de:

$$x = \gamma(x' + vt'), t = \gamma\left(\frac{v}{c^2}x' + t'\right). \quad (18)$$

Reluăm acum consecințele fizice ale axiomelor TRR.

a) Dilatarea timpului

Presupunem că în reperul (R) „fixat”, un orologiu înregistrează trecerea timpului de la valoarea t_1 la valoarea t_2 .

Notăm cu t'_1, t'_2 valorile corespunzătoare ale timpului într-unul și același punct de abscisă x' din reperul (R') „mobil”.

Atunci conform (18),

$$t_1 = \gamma\left(\frac{v}{c^2}x' + t'_1\right) \text{ și } t_2 = \gamma\left(\frac{v}{c^2}x' + t'_2\right) \text{ deci } t_2 - t_1 = \gamma(t'_2 - t'_1).$$

Deoarece $\gamma > 1$, rezultă că: $t_2 - t_1 > t'_2 - t'_1$. Așadar, orologiile aflate în deplasare merg mai încet (și îmbătrânim mai lent!).

Exemplu: Pentru un cosmonaut care se deplasează cu viteza $v = \frac{1}{50}c$, durata de pe Pământ se micșorează în Cosmos de $\gamma = \frac{50}{\sqrt{2499}} \cong 1,0002$ ori. Pentru oameni, totul este o fantezie, dar pentru particule elementare, care se deplasează cu viteze apropiate de c , TRR este esențială.

b) Relativitatea simultaneității

Considerăm două evenimente („flash”-uri) care au loc în reperul (R) la același moment t , dar în puncte de abscise x_1, x_2 . Atunci în reperul (R') ele se vor produce la momentele:

$$t'_1 = \gamma \left(t - x_1 \frac{v}{c^2} \right) \text{ și } t'_2 = \gamma \left(t - x_2 \frac{v}{c^2} \right).$$

Așadar,

$$t'_2 - t'_1 = \gamma \frac{(x_1 - x_2) \cdot v}{c^2} \text{ și ca atare, } t'_2 \neq t'_1.$$

Evenimente simultane în reperul (R) nu mai sunt astfel în (R'). Timpul nu mai poate fi separat de spațiu (ca la Newton). Mai mult, dacă $t_1 < t_2$, nu rezultă neapărat că $t'_1 < t'_2$, aceasta depinzând și de poziții! Și totuși, cauzalitatea nu este afectată.

c) Contrakția lungimilor

Considerăm relativ la reperul (R) o bară de lungimea l , ale cărei extremități au abscisele x_1, x_2 ($x_1 < x_2$). Atunci $l = x_2 - x_1$. Măsurând abscisele x'_1, x'_2 ale extremităților barei relativ la reperul (R') la un același moment t' și notând cu $l' = x'_2 - x'_1$, lungimea barei relativ la (R'), rezultă:

$$x_1 = \gamma \cdot (x'_1 + vt') \text{ și } x_2 = \gamma \cdot (x'_2 + vt'), \text{ conform (18).}$$

Scăzând ultimele relații, rezultă $l = \gamma \cdot l'$. Așadar, $l' < l$ deci bara aflată în mișcare se scurtează.

d) Compunerea (≡ adunarea) Einstein a vitezelor

Fie $u = \frac{dx}{dt}$ (respectiv $u' = \frac{dx'}{dt'}$) viteza la momentul curent în reperul (R) (respectiv (R')). Atunci: $u' = \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx'}{dt} \cdot \frac{dt}{dt'}$.

Dar conform (17),

$$\frac{dx'}{dt} = \gamma \left(\frac{dx}{dt} - v \right) = \gamma (u - v) \text{ și}$$

$$\frac{dt'}{dt} = \gamma \left(1 - \frac{v}{c^2} \cdot \frac{dx}{dt} \right) = \gamma \left(1 - \frac{v}{c^2} \cdot u \right) \text{ deci}$$

$$u' = \frac{u - v}{1 - (u \cdot v / c^2)}. \quad (19)$$

Rezolvând această ecuație de gradul întâi în raport cu u , rezultă:

$$u = \frac{u' + v}{1 + (u' \cdot v / c^2)}. \quad (20)$$

Dacă $u \ll c$ și $v \ll c$, atunci $u' \cong u - v$ și $u \cong u' + v$, regăsind compunerea Newton a vitezelor. Trebuie remarcat că dacă $u = c$, atunci din (19), $u' = \frac{c - v}{1 - (v/c)} = c$ și invers, dacă $u' = c$, atunci $u = c$.

Ca atare, transformarea Lorentz este compatibilă cu axioma constanței vitezei luminii.

În cadrul compunerii Newton ar fi trebuit acceptată o viteză de tipul $v + c$, fapt respins de Fizica actuală.

Exemplu: Un observator se depărtează de Pământ cu viteza $v = 0,2c$ și trimite un semnal luminos în sensul mișcării. Măsurând viteza semnalului, el găsește c . Care este viteza aceluiasi semnal observat de pe Pământ?

Răspuns: Așadar, $v = 0,2c$ și $u' = c$; conform (20), avem:

$$u = \frac{u' + v}{1 + (u' \cdot v / c^2)} = \frac{c + 0,2c}{1 + 0,2} = c.$$

Deci cei doi observatori obțin aceeași viteză pentru semnalul luminos (anume c), confirmând axioma secundă a TRR.

După Newton, am fi avut $u = u' + v = 1,2c$; inacceptabil.

Notă: Nu este exclus ca în viitor, în anumite experimente, să fie depășită viteza luminii și atunci o bună parte teoretică a Fizicii va fi revizuită. Însă, la scara omului, nu vor exista mari schimbări, așa cum nici TRR nu a produs mari mutații în viața cotidiană. Pentru orice $v \in \mathbb{R}$, am definit transformarea Galilei:

$$G_v: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2, (x, t) \mapsto (x + vt, t).$$

Similar, pentru orice $v \in (-c, c)$, se poate defini transformarea Lorentz $L_v: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2, (x, t) \mapsto (x + vt, \frac{v}{c^2}x + t)$.

Mulțimea $\{G_v | v \in \mathbb{R}\}$ formează **grupul Galilei** relativ la compunerea $G_v \circ G_w = G_{v+w}$, iar mulțimea $\{L_v | v \in (-c, c)\}$, formează **grupul Lorentz** relativ la compunerea $L_v \circ L_w = L_{v*w}$, unde $v*w = \frac{v+w}{1+(vw/c^2)}$ este adunarea Einstein a vitezelor. Apoi, dacă $\mathbf{e}_1 = (x_1, t_1)$ și $\mathbf{e}_2 = (x_2, t_2)$ sunt două „flash”-uri (evenimente în \mathbb{R}^2), se definesc cvasidistanțele d_G și d_L prin:

$$d_G(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) = |t_2 - t_1|;$$

$$d_L(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) = \sqrt{c^2(t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2} \text{ (aceasta din urmă fiind}$$

definită doar în ipoteza că \mathbf{e}_2 aparține conului viitorului cu vârful în \mathbf{e}_1 , căci altminteri ar fi un număr complex).

Aceste cvasidistanțe sunt invariante relativ la transformările Galilei și, respectiv, Lorentz, în sensul că:

$$d_G(G_v(\mathbf{e}_1), G_v(\mathbf{e}_2)) = d_G(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) \text{ și}$$

$$d_L(L_v(\mathbf{e}_1), L_v(\mathbf{e}_2)) = d_L(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2).$$

Am văzut că d_L conservă conurile viitorului.

Un mare succes al TRR l-a constituit faptul că ecuațiile lui Maxwell ale câmpului electromagnetic sunt invariante la transformările Lorentz.

Mariajul dintre Geometria euclidiană și Mecanica newtoniană a oferit un model al lumii vitezelor „mici”; la viteze și distanțe mari s-a impus modelul relativist al lui Einstein, care a condus la descoperirea unor obiecte matematice noi. Tocmai aceste creații interdisciplinare au promovat mari izbânzii tehnologice – laserul, compact-discul, fibra optică, celularele, GPS-ul etc., rezultate din mari descoperiri științifice și nu din „inspirații artisanale”.

§2. CONSTANTA h A LUI PLANCK ȘI EFECTUL FOTOELECTRIC

Constantele fizice sunt direct legate de concepte și legi fundamentale; în plus, pentru obținerea valorilor lor exacte s-a creat apropierea între fizicienii teoreticieni și cei experimentatori, care au înlesnit ulterior extinderile tehnologice.

În acest paragraf, avem ocazia revederii unor idei semnificative, care au făcut din Fizică un domeniu unitar, dinamic și capabil să dea răspuns diverselor provocări ale cunoașterii. În particular, constanta lui Planck, fundamentală în microcosmos, a răspuns la întrebări legate de sintagma „continuu – discret”, marcând momentul unui salt științific revoluționar – studiul fenomenelor cuantice.

2.1. Constante fizice universale

În jurul anului 1900, existau mai multe probleme deschise ale Fizicii clasice și printre ele se aflau problema radiației corpului negru, explicarea efectului fotoelectric, spectrele (≡amprementele) elementelor chimice și stabilitatea atomilor. Fuseseră stabilite mai multe legi fundamentale și explicitate diverse constante fizice universale, pe care le vom aminti pe scurt.

Dar una din constante, cea a lui Planck, avea un rol special, pentru că ea marca separarea între Fizica numită clasică și cea modernă.

Am evocat de mai multe ori în această carte:

- viteza luminii $c=3\times 10^8$ m/s (viteza maximă posibilă);
- numărul lui Avogadro $N_A\cong 6,023\times 10^{23}$ (numărul de molecule dintr-un mol de gaz, oricare ar fi el; Cap. 2, §1.1);
- sarcina electronului $e\cong 1,6\times 10^{-19}$ C (Capitolul 3, §1.2);

- masa electronului $M_e \cong 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$; masa protonului $M_p \cong 1,673 \times 10^{-27} \text{ kg}$ și masa neutronului $M_n \cong 1,675 \times 10^{-27} \text{ kg}$;
- constanta gravitațională $K \cong 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ (notată și G ; Capitolul 1, §2.2).

Numărul lui Avogadro arată cât de mici sunt atomii și moleculele și de ce structura „granulară”, discretă, a materiei nu este sesizabilă macroscopic.

Cu ajutorul lui N_A , am putut determina în Capitolul 2, §1 dimensiunile atomilor și distanțele mutuale.

La începutul secolului 20, prin experimente de difracție a razelor X în cristale, s-a putut determina lungimea lor de undă.

Un alt pas important l-a constituit formula lui Boltzmann $E_c = \frac{3}{2} kT$ pentru energia cinetică medie pe moleculă monoatomică și s-a putut demonstra că pentru un mol de gaz ideal (cu presiunea p și volumul V al recipientului), are loc relația:

$$p \cdot V = \frac{2}{3} N_A \cdot E_c = N_A \cdot k \cdot T \text{ (Capitolul 2, §2.3).}$$

Notând $R = N_A \cdot k$, a rezultat că $p \cdot V = R \cdot T$, deci legea gazelor ideale. În acest mod, s-au introdus în Fizică alte două constante universale:

- constanta lui Boltzmann: $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ (aceasta apare ca un factor de conversie de la temperatură la energie, fără a însemna că temperatura s-ar identifica prin energie);
- constanta universală a gazelor: $R = 8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$.

Am ajuns la momentul Max Planck.

În 1895, el lucra la o problemă aparent prozaică; anume, cum să creeze maximum de luminozitate la becurile electrice cu filament incandescent, cu minimum de energie. Pentru aceasta, el a studiat modul cum intensitatea radiației electromagnetice emise

de un corp negru (un perfect absorbant de radiații) depinde de frecvența radiației și de temperatura corpului.

Un domeniu important, nu numai pentru fizicieni, l-a constituit **Analiza spectrală**. În 1750, se descompunea, printr-o prismă, lumina rezultată de la diferite substanțe puse pe foc.

Așa s-a constatat că multe gaze fierbinți emit lumină de diverse culori (=lungimi de undă), cărora li se asociază un anumit spectru de emisie.

De exemplu, spectrul de emisie al sării de bucătărie este de lumină galbenă. Apoi după 1830, spectrul permitea detectarea diverselor elemente chimice componente ale unor substanțe (așa s-a descoperit He în Soare).

Mai târziu, s-au studiat radiațiile emise de solidele încălzite, determinându-se astfel temperatura (inclusiv temperatura Soarelui). Un efect concertat s-a realizat pentru studiul radiației corpului negru. Un exemplu bun de corp negru îl constituie un cuptor din material înalt refractar, având un mic orificiu și aflat la diverse temperaturi.

Pentru un observator extern, orificiul sugerează suprafața unui corp negru dacă pereții interiori ai cuptorului sunt înnegriți și ruгоși; orice radiație incidentă din exterior va fi aproape complet absorbită prin reflexiile multiple din interior (raza, odată intrată, nu mai poate ieși).

În interiorul cuptorului, radiațiile luminoase și termice iau forma diverselor unde staționare cu capete fixate de pereții interiori (ca în cazul undelor sonore ale corzilor de vioară). La temperaturi joase, undele se află în zona infraroșie a spectrului (invizibilă ochiului uman); după ce temperatura crește, cuptorul radiază lumină roșie, apoi portocalie, galbenă și alb-albastră.

Zona de intensitate maximă a energiei radiate se deplasează spre lungimi de undă mai mici („spre violet”).

Măsurând energia radiantă care părăsește interiorul cuptorului, fizicianul german Wien a stabilit în 1896 legătura dintre temperatură și lungimea de undă λ_{max} când radiația are intensitate maximă; anume:

$$\lambda_{max} \cdot T = C_0, \text{ constant.} \quad (21)$$

Constanta C_0 are valoarea $0,2898 \text{ cm} \cdot \text{K}$ și este independentă de forma orificiului și de materialul cuptorului. Așadar, dacă T crește, atunci λ_{max} scade și frecvența ν_{max} crește.

Dependența intensității radiației unui corp negru de lungimea λ de undă este indicată în figura 6.5.

Notă: În acest paragraf, frecvența a fost notată cu „ ν ” și nu cu „ f ”, deoarece prin T se notează temperatura și nu perioada unor oscilații.

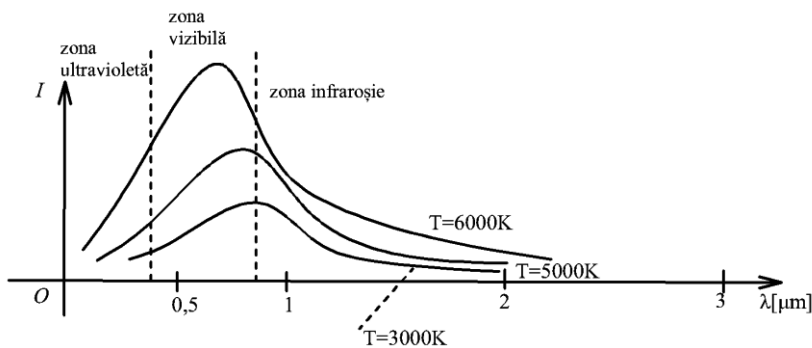


Fig. 6.5

Exemple:

1) O plită de $725^\circ\text{C} \equiv 1000 \text{ K}$ are culoarea roșie, iar Soarele are la suprafață 5725 K (culoarea galbenă).

2) De exemplu, pentru $T=6000\text{ K}$, conform legii (21) a lui Wien, avem $\lambda_{max} = \frac{0,2898 \times 10^{-2}}{6000} \times 10^6 \cong 0,48\text{ }\mu\text{m}$ și pentru $T=3000\text{ K}$, $\lambda_{max} \cong 0,96\text{ }\mu\text{m}$.

Formula (21) sugerează că odată cu creșterea temperaturii T , scad lungimile de undă spre zona ultravioletă, cu creșterea nemărginită a intensității radiației.

Ca atare, frecvența creștea, în timp ce realitatea arăta că oscilatorii atomici nu vibrau în mod corespunzător.

Această contradicție a creat un adevărat șoc în lumea fizicienilor, primind numele spectaculos de „catastrofa ultravioletă”, care nu putea fi explicată în cadrul Fizicii ondulatorii clasice, unde lumina era privită exclusiv ca o undă electromagnetică.

Max Planck a pornit de la relația (21) și a considerat expresia: $\lambda_{max} \cdot T \cdot \frac{k}{0,2014 \cdot c} = C_0 \cdot \frac{k}{0,2014 \cdot c}$, unde k este constanta lui Boltzmann. Aceasta este o constantă având dimensiunea $\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{J/K} \cdot (\text{m/s})^{-1} = \text{J} \cdot \text{s}$ și pe care a notat-o cu h . Valoarea ei este:

$$\frac{0,2898 \times 10^{-2} \times 1,38 \times 10^{-23}}{0,2014 \times 3 \times 10^8} \cong 6,6 \times 10^{-34} [\text{J} \cdot \text{s}],$$

deci are dimensiunea unei acțiuni (\equiv putere=energie \times timp).

Constanta h a primit numele de **constantă Planck a acțiunii** și are valoarea mai precisă:

$$h = 6,625 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4,135 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s} \quad (22)$$

($1\text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ și este energia generată de 1 C sub acțiunea unei tensiuni de 1 V).

Spre deosebire de constantele fizice universale reamintite anterior, constanta lui Planck are o dată de naștere clară: 14 decembrie 1900, dată la care Planck a ținut o comunicare la

Societatea germană de Fizică, unde a explicat radiația corpului negru și a rezolvat paradoxul „catastrofei ultraviolete”. Planck a făcut ipoteza radicală că energia conținută în undele staționare din interiorul cuptorului nu ia valori continue, ci doar anumite valori discrete, chiar infimezimale, conform fiecărei culori în parte.

Mai precis, un oscilator cu frecvența ν poate absorbi sau emite energie doar în porții discrete, numite **cuante**. Totodată, el a demonstrat matematic că, în cazul corpului negru aflat la echilibru termic, intensitatea radiației la lungimea de undă λ și temperatura T are expresia:

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}. \quad (23)$$

Nu dăm demonstrația. Notăm că pentru $\lambda T \ll 1$, se poate aplica formula aproximativă $e^x - 1 \cong x$. Formula (23) a fost deplin confirmată experimental;

În plus, pentru T fixat, rezolvând ecuația $\frac{dE}{d\lambda} = 0$, s-a obținut valoarea $\lambda_{max} = C_0 / T$, conform cu legea (21).

Valorile λ_{max} și T se pot determina experimental deci se află C_0 , apoi se determină h și celelalte constante k , N_A , ceea ce arată în fond armonia internă a conceptelor fizice.

Esența contribuției nemuritoare a lui Planck o constituie **LEGEA (lui Planck a radiației)**: „Energia electromagnetică emisă sau absorbită la frecvența ν este:

$$E = h \cdot \nu \quad (24)$$

Așadar, energia conținută în undele staționare, din interiorul cuptorului, nu există în orice cantitate ci poate lua doar anumite valori discrete, conform fiecărei culori în parte.

Oscilatorii atomici nu pot schimba cu mediul orice cantitate de energie, ci numai valori discrete (\cong , „pe sărite”), cuante

de energie de forma $E_n = n \cdot h \cdot \nu$, unde ν este frecvența oscilațiilor și $n \in \mathbb{N}$.

Prin această lege, caracterul discret al materiei profunde este încă o dată confirmat, după ce se lămurise structura atomică a materiei, se stabilise tabelul periodic al elementelor (\equiv atomilor) lui Mendeleev, iar Boltzmann deschisese un nou capitol de știință, cel al Mecanicii statistice.

Exemplu: Care este energia E a unei cuante de lumină roșie? Dar albastră?

Răspuns. În primul caz, $\nu = 4,6 \times 10^{14}$ Hz deci

$$E = h \cdot \nu = 6,6 \times 10^{-34} \times 4,6 \times 10^{14} \cong 3 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

În cazul secund,

$$\nu = 7 \times 10^{14} \text{ Hz și } E \cong 4,6 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

Notă: La nivelul simțurilor noastre, energia este o mărime care variază continuu. De exemplu, energia cinetică a unei bile ce coboară pe un plan înclinat crește continuu.

Energiile de care vorbim în legea lui Planck sunt de 10^{19} ori mai mici și la scara umană ele par tot continuu.

2.2. Efectul fotoelectric

Descrierea efectului fotoelectric („phos” \equiv lumină)

În 1887, Hertz a observat că dacă pe o suprafață metalică ajunge un flux de radiație ultravioletă, atunci metalul emite anumite particule, care ulterior s-au dovedit a fi electroni.

Fenomenul s-a numit **efectul fotoelectric extern**.

Mai târziu, s-a realizat următorul experiment (figura 6.6): o lumină monocromatică incidentă cade pe o placă metalică și această radiație electromagnetică are suficientă energie pentru a

extrage electroni din metal, dintre care unii ajung la un colector (placă electrod).

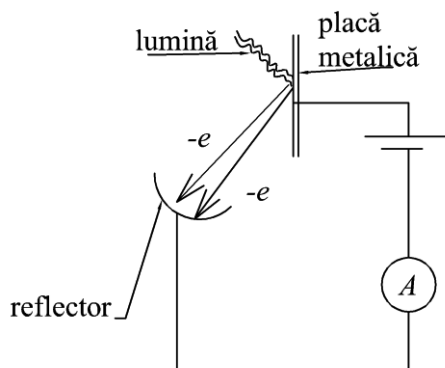


Fig. 6.6

Curentul fotoelectric rezultat a fost măsurat de un ampermetru. Variind intensitatea și frecvența luminii incidente, ca și diferența de potențial dintre placă și colector, fizicianul german W. Hallwachs a făcut măsurători ale fluxului radiației incidente și ale intensității curentului fotoelectric, deducând legea de proporționalitate dintre acestea; de asemenea, a determinat frecvența ν a radiației sub care efectul fotoelectric nu are loc.

Notă: Termenul „extern” se referă la aceea că emisia de electroni se realizează de pe suprafața metalelor (sau semiconductorilor), sub acțiunea luminii; există și un efect fotoelectric intern, care revine la creșterea conductibilității electrice a unui semiconductor sub acțiunea iluminării.

Celulele fotoelectrice aplică acest efect pentru a transforma energia luminoasă în energie electrică.

Mai general, efectul fotoelectric este privit ca un fenomen de interacțiune între radiație și substanță, prin care electronii sunt smulși prin absorbție de energie de la o radiație electromagnetică de tipul razelor X sau luminii.

Studiul acestui fenomen a condus la înțelegerea dualității undă–particulă a luminii.

Explicația efectului

Acest efect a constituit o provocare pentru fizicieni în perioada 1890–1910 și a marcat începutul fizicii cuantice. În 1905, Einstein a găsit în lucrarea lui Planck inspirația necesară și cheia explicației efectului fotoelectric. Anume, el a considerat că nu numai oscilatorii atomici ai corpului negru sunt cuantizați, dar și lumina însăși este formată din cuante (mici „porții”) de energie pe care le-a numit **fotoni** și cărora le-a atribuit un caracter corpuscular.

Efectul fotoelectric părea în contradicție cu natura ondulatorie a luminii.

Dar similar cu legea lui Planck, are loc:

LEGEA (lui Einstein)

„Energia E_f a unui foton este:

$$E_f = h \cdot \nu, \quad (25)$$

unde ν este frecvența unde electromagnetice luminoase și h este constanta lui Planck. Energia totală la frecvența ν este $n \cdot h \cdot \nu$, unde n este numărul de fotoni aflați la această frecvență”.

Așadar, energia asociată luminii incidente este furnizată în cuante/fotoni, a căror energie depinde doar de frecvența luminii, nu și de intensitatea ei. Intensitatea unui fascicul de lumină depinde de numărul de fotoni care lovesc perpendicular suprafața în unitatea de timp. Aceștia se comportă ca particule (\equiv corpusculi) care se deplasează cu viteza luminii, au masa nulă, fiecare având propria energie (egală cu $h\nu$). Dacă lumina are

lungimea de undă λ , atunci frecvența ei este $\frac{c}{\lambda}$ și fiecare foton component are energia $\frac{h \cdot c}{\lambda}$.

Orice foton, având o frecvență suficient de mare, generează energia suficientă pentru a smulge un singur electron, contribuind astfel la efectul fotoelectric.

Exemplu: Un laser (\equiv dispozitiv care generează un fascicul de lumină monocromatică, în care toate componentele au aceeași frecvență) emite o lumină verde monocromatică, cu frecvența $\nu = 6 \times 10^{14}$ Hz.

- a) Care este energia a 100 fotoni din acel laser?
- b) Dacă puterea emisă este de 10^{-2} W, care este numărul de fotoni emiși pe secundă?

Răspuns:

- a) Conform (25),

$$E_f = 10^2 \times 6 \times 10^{14} \times 6,625 \times 10^{-34} \cong 39,8 \times 10^{-18} \text{ J.}$$

- b) Numărul n de fotoni este:

$$n = \frac{10^{-2}}{39,8 \times 10^{-18}} \cong 25 \times 10^{13} \text{ fotoni/s.}$$

Determinări cantitative

În procesul de fotoemisie, dacă un electron absoarbe energia unui foton și are suficientă energie, el este smuls din material (metalic).

Dacă energia fotonului este prea mică, electronul nu scapă de pe suprafața materialului. Crescând intensitatea fluxului de lumină, crește numărul de fotoni pe unitatea de timp și ca atare, numărul de electroni emiși fără a le crește energia acestora. În acest mod, energia electronilor smulși/emiși nu depinde de intensitatea luminii incidente, ci doar de energia fotonilor

individuali. Electronii pot absorbi energie din fotonii cu care a fost iradiată suprafața metalică; o parte din energie eliberează electronul din atom și restul contribuie la energia cinetică a electronului ca particulă liberă generatoare a curentului fotoelectric.

S-au făcut următoarele constatări:

- pentru un metal dat și o anumită frecvență a radiației luminoase incidente, rata cu care electronii sunt smulși este direct proporțională cu intensitatea acelei radiații (curentul stabilit prin circuit este proporțional cu intensitatea fascicului luminos);
- pentru un metal dat, există o frecvență minimă (\equiv de prag) a radiației incidente sub care nu se mai emit (smulg) electroni;
- deasupra frecvenței de prag, energia cinetică maximă a unui electron emis este independentă de intensitatea luminii incidente;
- durata dintre momentul incidenței radiației și emisia electronului este de ordinul a 10^{-9} s.

Notând cu ν frecvența fotonului incident și cu ν_0 frecvența de prag, energia minimă pentru a scoate un electron de la suprafața metalului este $W=h \cdot \nu_0$. Notând cu m masa de repaus a electronului emis și cu v_{max} viteza sa maximă, atunci energia cinetică maximă a electronului emis este $(E_c)_{max}=\frac{1}{2}m \cdot v_{max}^2$.

Ecuția de bilanț energetic este $h \cdot \nu = W + (E_c)_{max}$, adică $h \cdot \nu = h \nu_0 + (E_c)_{max}$. Deoarece $E_c > 0$, rezultă că dacă $\nu < \nu_0$, atunci nu se emit electroni. Se poate totodată formula

LEGEA (ecuația lui Einstein a efectului fotoelectric):

„Are loc relația:

$$(E_c)_{max} = h \cdot (\nu - \nu_0) \quad (26)$$

Am văzut anterior că lumina lovește o placă metalică și o altă placă electrod colectează electronii emiși. Se poate măsura

potențialul dintre aceste plăci, precum și curentul electric instituit (figura 6.6).

Pentru o frecvență fixată a luminii, curentul fotoelectric atinge o valoare de saturație ce nu mai crește și depinde de intensitatea luminii. Dacă se aplică un potențial negativ pe colector în raport cu placa metalică, curentul fotoelectric descrește până la anulare; acel potențial V_0 se numește **voltaj de stopare** și depinde de material.

Pentru o frecvență fixată, lucrul necesar pentru stoparea unui electron este $e \cdot V_0$ (unde e este sarcina electronului); acesta este egal cu $(E_c)_{max}$ și conform (26), are loc relația:

$$e \cdot V_0 = h \cdot (\nu - \nu_0).$$

$$\text{Dar, } \frac{h}{e} = \frac{6,625 \times 10^{-34}}{1,6 \times 10^{-19}} \cong 4,14 \times 10^{-15} \text{ V} \cdot \text{s deci}$$

$$V_0 \cong 4,14 \times 10^{-15} \cdot (\nu - \nu_0). \quad (27)$$

Exemplu: Reamintim că pentru partea vizibilă a spectrului electromagnetic, lungimea de undă variază între 400 nm și 760 nm și frecvența între 4,0 și $7,5 \times 10^{14}$ Hz (conform Cap. 5, §4.5); în cazul unei lumini albastre cu $\nu \cong 7 \times 10^{14}$ Hz și $\nu_0 \cong \frac{\nu}{4}$, rezultă conform (27), $V_0 \cong 4,14 \times 10^{-15} \times \left(7 - \frac{7}{4}\right) \times 10^{14} \cong 2,2 \text{ V}$. Pentru lumina violet, voltajul de stopare este de ordinul 1 V.

Efectul fotoelectric necesită fotoni cu energii cuprinse între câțiva eV și câțiva MeV, în elemente cu număr atomic mare.

Aplicațiile efectului fotoelectric sunt multiple: celulele foto, alarmele antifurt, sistemele automate de deschidere/închidere a ușilor, cititoare de CD sau de coduri, detectoare de fum, microscopul electronic etc. De asemenea

trebuie menționate panourile solare (care transformă lumina solară în electricitate).

Conversia energiei solare în energie electrică a fost descoperită de Becquerel în 1839 (**efectul fotovoltaic**). Acest efect este datorat eliberării de sarcini negative (electroni) și pozitive (goluri) într-un material solid care interacționează cu lumina; în ultimul timp, s-au creat celule și panouri fotovoltaice realizate din semiconductori (îndeosebi din siliciu). De astfel de efecte s-a ocupat și N. Tesla, care a obținut un brevet relativ la motoare cu curent fotoelectric alternativ.

Pentru a prezenta toate acestea, trebuie scrise cărți întregi. Ne-am limitat la a sublinia câteva concepte de bază, legate de progresele științifice semnificative, încercând îndeosebi să ajutăm la înțelegerea principiilor Mecanicii cuantice.

Notă: Ca o curiozitate de istoria științei, Planck a primit premiul Nobel în 1915 pentru studiul radiației corpului negru. Einstein a primit același premiu în 1921, dar nu pentru Teoria relativității, cum ar fi fost cazul, ci pentru efectul fotoelectric (unde a fost anticipat de Hertz și Lenard). Pentru comunitatea decidenților, limitele Mecanicii newtoniene nu trebuiau depășite.

§3. PREMISELE FONDATOARE ALE MECANICII CUANTICE

La sfârșitul secolului al XIX-lea, în laboratoarele științifice avansate ale lumii se realizaseră mai multe experimente cu rezultate surprinzătoare. După ce Gauss și Weber descoperiseră telegraful electromagnetic, Bell inventase telefonul (≡transmiterea la distanță a semnalului vocal), Edison – becul electric, iar Tesla impusese curentul electric alternativ, lumea

științifică aștepta elaborarea unei teorii complete și coerente, mai ales că se înmulțiseră experimentele neelucidate, care generau curiozitate sau contraziceau simțul comun.

Se anunța începutul unei noi ere în Fizică, așteptând spiritele sintetizatoare și ordonatoare.

Adăugăm că, din dorința de a confirma experimental teoria lui Maxwell privind generarea undelor electromagnetice, Hertz reușea în 1887 să transmită semnale electrice la distanță, iar după câțiva ani, Marconi inventa radioul. Apoi fizicianul englez Thomson studia structura atomului utilizând tehnica descărcărilor în gaze în tuburi etc. Așa cum am văzut, ideea insolită a lui Planck că în unele sisteme, energia se emite și se absoarbe în „porții” („cuante”) a lămurit situații care pentru fizicienii vremii nu aveau soluție. Descoperirea structurii atomice/discrete a materiei, natura luminii și integrarea unitară a noilor concepte au arătat că totul trebuia regândit, modificând percepția asupra microcosmosului („infinitul mic”) și asupra Universului („infinitul mare”).

3.1. Concepția clasică despre atomi

Trecem în revistă câteva momente semnificative care au condus la fixarea percepției asupra atomilor, dar și la depășirea legendei particulelor „indivizibile”.

Fiecare din aceste momente este legat de câte un capitol al viitoarei Mecanici cuantice.

a) Tabelul periodic al elementelor

Chimistul rus D. Mendeleev a reușit ordonarea elementelor chimice (≡tipurilor de atomi) cunoscute în 1870; ordonarea s-a făcut după masele lor atomice, descoperindu-se și

o anumită periodicitate a proprietăților. Se cunoșteau doar 60 de elemente, inclusiv cel mai ușor – hidrogenul; Mendeleev a făcut câte o fișă cu proprietățile lor. A început cu litiul (Li), cu beriliul (Be), borul (B), carbonul (C) și când a ajuns la al 8-lea – sodiul (Na), Mendeleev a remarcat că acesta avea proprietăți similare cu litiul și l-a așezat pe linia a doua (sub Li); la fel, a așezat potasiul (K) sub Na etc. În lipsa unei teorii justificative, care a venit abia după 1930, Mendeleev a contribuit mult la înțelegerea structurii constitutive a materiei.

Între timp, tabelul a fost completat până la toate cele 109 elemente cunoscute și s-a adoptat ordonarea după numerele atomice Z (care diferă puțin de ordonarea pe mase atomice).

Notă: Mendeleev a aplicat un „principiu reduționist”, anume al reducerii la cărămizile de bază ale domeniului, adoptat în multe alte situații. De exemplu, frazele se descompun în propoziții, propozițiile în cuvinte, acestea în litere; lumina se descompune în culorile fundamentale; oscilațiile periodice se descompun în armonice, semnalele și imaginile, în componente cu diferite „zoom”-uri etc.

b) Spectrele atomice

Dacă un curent electric trece printr-un gaz (sau amestec de gaze), acesta se colorează (ca la firmele cu neon) și degajă un **spectru de emisie**, un fel de „amprentă” care permite identificarea componentelor. Atunci când lumina albă trece printr-un gaz rece, apar linii spectrale care formează **spectrul de absorbție** (cu mai puține linii). Așa a fost descoperit heliul, anume din cercetarea liniilor spectrale ale luminii solare. Aceste

spectre au apărut ca o curiozitate spectaculoasă, dar după câteva zeci de ani au primit explicația în cadrul Mecanicii cuantice.

c) Razele catodice și razele X

După 1870 s-au inventat pompele de vid și generatoarele electrice de înaltă tensiune. S-a descoperit că o astfel de tensiune aplicată între doi electrozi, într-un tub cu gaz rarefiat, produce curent electric și lumină. Pe măsură ce aerul din tub este eliminat, apar scântei între electrozi și o lumină de tip neon (spre galben verde). Așezând o placă metalică în tub (figura 6.7), aceasta aruncă o umbră.

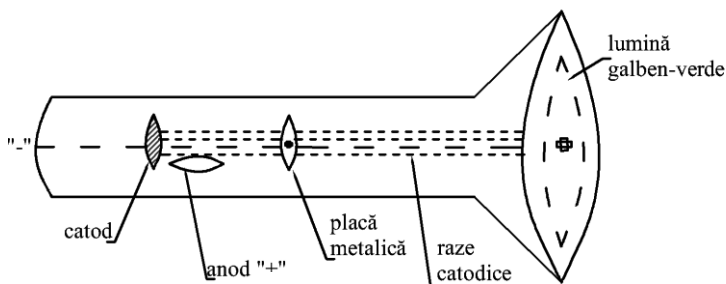


Fig. 6.7

Un magnet plasat lângă tub deviază razele (numite **catodice**), care sunt un flux de particule încărcate venite de la catod. J. J. Thomson a arătat că razele catodice sunt deviate și de câmpuri electrice; le-a studiat în detaliu, a măsurat raportul sarcină/masă și a lansat în 1897 ipoteza că atomii gazului din tub s-au dezintegrat! Razele catodice s-au dovedit a fi fluxuri de **electroni**. Cu acest prilej, s-a descoperit că atomul **nu** este indivizibil și că are o structură internă care trebuie lămurită. Mai târziu, s-au măsurat masa $M_e \cong 9,1 \times 10^{-31}$ kg și sarcina electrică $(-e)$, unde $e \cong 1,6 \times 10^{-19}$ C.

În plus, razele catodice au condus la o altă descoperire epocală, datorată fizicianului german W. Roentgen în 1895; acesta a observat că o hârtie fotosensibilă de lângă un tub de raze catodice aflat în funcțiune a fost acoperită cu o substanță fluorescentă. Noile raze difereau de cele catodice; având lungimile de undă mici, erau penetrante prin corpul uman, lemn, cauciuc, aluminiu și nu erau abătute de magnet. Li s-a spus raze X pentru că nu li se știa natura; doar după câțiva ani, s-a dovedit că ele sunt o radiație electromagnetică de înaltă frecvență, create atunci când electronii din tubul cu raze catodice sunt încetiniți.

Razele X au creat o mare emoție printre medici (pentru informațiile privind organele interne ale corpului uman) și în plus, au permis explicarea unor discrepante din tabelul lui Mendeleev. Relativ rapid, Roentgen a primit premiul Nobel (în 1901).

d) Modelele succesive ale atomului

Primul model l-a oferit Thomson, ținând cont de informațiile oferite de spectrele de emisie/absorbție și de razele catodice. Atomul ar avea o formă sferică și este neutru electric, cu electronii (încărcați negativ) dispuși într-un „gel” (cu sarcini pozitive); forțele electrice fac ca electronii să oscileze, generând undele electromagnetice observate în spectrul de emisie.

Modelul Thomson nu a putut lămuri caracteristicile repetitive din tabelul lui Mendeleev, sugerând că elementele diferă prin numărul de electroni. Mai târziu, Rutherford (un elev al lui Thomson) a descoperit particulele α cu care a bombardat diverse materiale; din ciocnirile cu atomii acestora, a dedus că sarcinile pozitive sunt concentrate în centrul atomului (pe care l-a numit **nucleu**), iar electronii se află pe orbite în jurul nucleului,

la mare distanță de acesta. Acest model numit „planetar” nu a putut explica liniile spectrale și nici proprietățile periodice ale elementelor chimice.

Un mare progres l-a realizat danezul N. Bohr, care a propus, în 1913, un model al atomului care ținea cont de toate achizițiile, explica spectrele atomice pentru H și He, nevoia de a ordona elementele în tabelul lui Mendeleev după numerele atomice (\equiv numerele de electroni). Modelul lui Bohr a încorporat energiile discrete ale lui Planck și fotonii lui Einstein, bazându-se pe trei postulate: electronii se deplasează pe anumite orbite discrete; electronii de pe o orbită permisă nu radiază și dacă un electron sare de pe o orbită pe alta, el emite sau absoarbe un foton, a cărui energie este egală cu diferența energiilor celor două orbite. Acest model a devenit un punct central în elaborarea Mecanicii cuantice, la care ne vom referi ulterior.

3.2. Concepția modernă despre atomi

Primul constituent elementar al materiei, descoperit de J. J. Thomson în 1897, a fost **electronul**, ca particulă (considerată punctuală) cu sarcina electrică negativă $-e$. Deoarece materia uzuală este de obicei neutră electric („nu ne curentează”), există și constituenți cu sarcini pozitive; ea este compusă din electroni și nuclee încărcate pozitiv și multe nuclee sunt formate din **protoni** (încărcați pozitiv) și **neutroni** (fără sarcină). Materia absoarbe sau emite radiații la frecvențe discrete. De exemplu, orice gaz are frecvențe proprii de emisie sau absorbție dar nu într-un spectru continuu de frecvențe, așa cum prevedeau modelele Thomson sau Rutherford ale atomilor.

S-a stabilit deci că nucleele sunt purtătoare de sarcini pozitive și că masa lor reprezintă cvasi-totalitatea masei atomului, în timp ce electronii ocupă o regiune exterioară a nucleului. Fiecare nucleu are o rază de circa 10^{-13} cm. Cel mai simplu nucleu este cel de hidrogen, redus la un singur proton cu sarcina $+e$.

Definiție: Pentru orice nucleu, se numește **număr atomic**, notat cu Z , numărul de protoni cuprinși în acel nucleu. Numărul Z este și **număr de ordine** (în tabelul lui Mendeleev).

Numărul de electroni din atomul respectiv este tot Z deci atomul este neutru electric.

Definiție: Pentru orice nucleu, se numește **număr de masă** suma dintre numărul protonilor și numărul neutronilor, notat A . Așadar, $A-Z$ este egal cu numărul neutronilor.

Neutronii sunt importanți îndeosebi pentru masa lor, căci cresc masa nucleului. Atomii cu $Z=1, 2, \dots, 92$ (cu excepția valorilor 43, 61, 85) se întâlnesc în natură. Nucleele cu $Z=43, 61, 85$ și cele cu $Z=93, 94, \dots, 109$ au fost produse artificial și se dezintegrează rapid.

Exemple:

- 1) În cazul atomilor de hidrogen, avem $Z=1$ și $A=1$.
- 2) Nucleele cu $Z=84, 86, 87, \dots, 92$ sunt instabile și se dezintegrează spontan.

Definiție: Pentru Z dat, atomul are Z electroni și Z protoni, dar numărul de neutroni nu este bine determinat. Nucleele diferite care au același Z se numesc **izotopi**.

Exemple:

- 1) Nucleul de hidrogen ($Z=1$) are doi izotopi: **deuteriul** cu 1 proton și 1 neutron (deci $A=2$) și **tritiumul** cu 1 proton și 2 neutroni ($A=3$).

2) Carbonul (C) are mai mulți izotopi. Cel mai abundent în natură este ^{12}C cu 6 protoni și 6 neutroni ($Z=6, A=12$). Un alt izotop este ^{14}C cu 6 protoni și 8 neutroni, folosit în Arheologie pentru datarea materialelor biologice cu vechime (oase, lemne).

Notă: Iată un tabel sintetic ce poate fi util:

Particula	Masa [kg]	Sarcina el.	Simbol
Proton	$M_p=1,673 \times 10^{-27}$	$+e$	p^+
Electron	$M_e=9,11 \times 10^{-31}$	$-e$	e^-
Neutron	$M_n=1,675 \times 10^{-27}$	0	n^0

Se observă că $M_p \cong M_n \cong 1837 M_e$ și se poate arăta că masa M a oricărui nucleu satisface inegalitățile: $Z \cdot M_p \leq M \leq 3Z \cdot M_p$.

În studiul unui atom, deoarece $M \gg M_e$, nucleul se consideră ca un punct fix, ca în cazul sistemului solar unde, pentru comoditate, Soarele este considerat fix.

Forțele dintre constituențele materiei – electroni și nuclee sunt date de legea lui Coulomb (Capitolul 3, §1.2):

Dacă două particule au sarcinile electrice q, q' localizate în punctele M, M' , atunci forța ce acționează asupra lui q datorită lui q' este $\vec{F} = \epsilon q q' \frac{\overrightarrow{MM'}}{\|\overrightarrow{MM'}\|^3}$; forța opusă $-\vec{F}$ acționează asupra lui q' . Dacă $qq' < 0$, forța este atractivă, altminteri este repulsivă.

Forțele electrice sunt responsabile pentru stabilitatea atomului. Electronii se află mereu în mișcare, deoarece altfel ar fi atrași de nucleu și s-ar prăbuși în el (tot așa cum dacă Pământul nu s-ar mișca s-ar prăbuși în Soare). Dar în același timp, sarcinile electrice accelerate emit o radiație electromagnetică, cu pierdere de energie și s-a pus **problema stabilității atomilor**. Bohr a încercat să împacă Mecanica newtoniană cu Electromagnetismul

și cu ideile lui Planck; el a postulat orbitele discrete ale electronilor, care săreau de pe o orbită pe alta la absorbția sau emisia de fotoni, dar nu inclusese în calcule efectele relativiste.

3.3. Câteva elemente de Mecanică cuantică

Unul din scopurile Mecanicii cuantice este studiul constituentelor elementare ale materiei, al stabilității acestora și al proceselor fizice ale căror caracteristici (de exemplu, acțiunea) sunt comparabile ca ordine de mărime cu constanta h a lui Planck. Mărimile fizice ale căror valori pot fi măsurate experimental – energie, impuls, moment cinetic – se mai numesc **observabile**.

Deoarece pentru măsurarea mărimilor microscopice se apelează, de regulă indirect, la dispozitive macroscopice de măsură, rezultatele sunt variabile aleatoare (adică mărimi ξ astfel încât pentru orice număr real r să se poată estima probabilitatea evenimentului $\xi \leq r$, deci ca valorile mărimii ξ să fie sub pragul r).

a) Undele lui de Broglie

În 1923, fizicianul și prințul francez, Louis de Broglie, a înlocuit modelul Bohr, introducând ideea revoluționară că „electronii se comportă ca undele”, tot așa cum fotonii se comportă ca unde sau ca particule. El a extins deci dualismul undă/particulă de la lumină la particulele atomice. De Broglie a postulat că lungimea de undă $\lambda = \frac{c}{\nu}$ a unui electron are expresia:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot \nu}, \quad (28)$$

unde h este constanta lui Planck, $m = M_e$ masa electronului și ν viteza lui.

Formula (28) a fost confirmată experimental în 1926 și considerată ca o victorie a „experimentelor mentale”, răsplătită cu premiul Nobel în 1929. Această descoperire a condus la o nouă înțelegere a naturii entităților atomice. La nivel microscopic, nu există deosebiri sesizabile între unde și particule.

Fotonii au câteva caracteristici ale particulelor:

- au energie, impuls și moment cinetic;
- fotonii au viteza c și nu se află în repaus, deci masa lor de repaus este nulă;
- interacțiunile dintre fotoni și atomi sau electroni ascultă de legile ciocnirilor elastice, cu particularitatea că fotonii cedează întreaga lor energie sau deloc („totul sau nimic”), atunci când fotonul își cedează energia, el dispare;
- fotonii sunt neutri electric, deci nu au sarcină electrică.

De Broglie a arătat că impulsul unui foton este, conform (28):

$$p = \frac{h \cdot \nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (29)$$

și conform legii (25) a lui Einstein, energia unui foton este:

$$E_f = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} = p_f \cdot c. \quad (30)$$

Notă: Louis de Broglie a asociat oricărei microparticule cu energia totală relativistă $E = h \cdot \nu$ și impulsul $p = \frac{h}{\lambda}$, o undă teoretică având frecvența $\nu = \frac{E}{h}$ și lungimea de undă $\lambda = \frac{h}{p}$, inspirată de relațiile anterioare, numită **unda lui de Broglie**.

Atunci conform relației (10), $\nu = \frac{E}{h} = \frac{mc^2}{h} = m_0 c^2 / h \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$

și $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \nu} = \frac{h}{m_0 \nu} \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$, deci $\lambda \nu = \frac{E}{p} = \frac{c^2}{v}$.

Dar λv este numită viteza de fază a undei lui Broglie (și diferă de viteza reală, deoarece $\frac{c^2}{v} > c$). Atenție: nu trebuie confundate notațiile vitezei și frecvenței.

b) Efectul Compton

Un argument concret în favoarea modelului propus de Louis de Broglie a fost adus de fizicianul american Compton. Urmărind acțiunea radiațiilor X asupra diferitelor materiale și modul de împrăștiere a lor pe o bucată de grafît, el a găsit în fasciculul împrăștiat, radiații X având o lungime de undă (λ) mai mare decât cea a undelor incidente (λ_0); în plus, diferența $\lambda - \lambda_0$ (numită deplasare Compton) depinde de unghiul α sub care se realizează observarea.

Efectul Compton constă în creșterea lungimii de undă și implicit, scăderea frecvenței, pentru o parte din radiațiile X împrăștiate de un corp bombardat cu raze X (datorită cedării unei părți din energia acestora).

Reamintim că efectul fotoelectric este datorat interacțiunii fotonilor cu electronii dintr-o placă metalică. Electronii care au absorbit întreaga energie a fotonilor incidenți au suficientă energie pentru a părăsi placa (energia fotonilor incidenți fiind transferată metalului).

Dar în efectul fotoelectric nu există electroni liberi, deoarece un electron liber nu poate absorbi sau emite un foton. Însă dacă există o decalare în timp, cele două procese se pot produce; anume, dacă un electron absoarbe un foton cu energia $h \cdot \nu_0$, conform (30) și dacă după un scurt timp emite un foton cu

energia $h \cdot \nu$, atunci, după recul, electronul capătă o energie cinetică comparabilă cu energia sa de repaus mc^2 .

Așadar, are loc relația $h \cdot \nu_0 = h \cdot \nu + E_c$, adică

$$\frac{h \cdot c}{\lambda_0} = \frac{h \cdot c}{\lambda} + E_c. \quad (31)$$

În starea inițială, avem un foton cu energia inițială $h \cdot \nu_0$ și impulsul $(p_f)_{in} = \frac{h}{\lambda_0} = \frac{h \cdot \nu_0}{c}$ (conform (29)) și un electron în repaus având impulsul nul și energia mc^2 . Iar în starea finală, avem un foton cu impulsul $(p_f)_f = \frac{h}{\lambda} = \frac{h \cdot \nu}{c}$ și energia $h \cdot \nu$ (orientat sub unghiul α în raport cu direcția fotonului incident) și un electron rapid având impulsul $p_e = m \cdot v$ (orientat sub unghi β față de direcția fotonului incident) și energia mc^2 (figura 6.8).

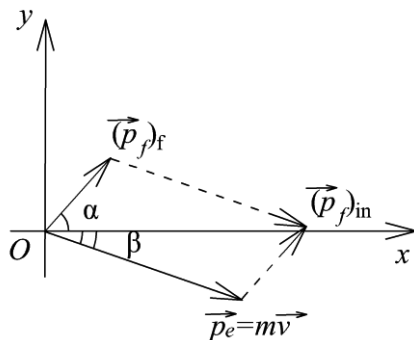


Fig. 6.8

Aplicând legea conservării impulsului (Capitolul 1, §4.2) sub forma ei vectorială, rezultă: $(\vec{p}_f)_{in} + 0 = (\vec{p}_f)_f + \vec{p}_e$.

Alegem un sistem ortonormal de axe xOy cu Ox pe direcția impulsului inițial. Reamintim că notând cu \vec{i} și \vec{j} versorii axelor Ox și Oy , orice vector \vec{w} cu mărimea w se scrie:

$$\vec{w} = w(\cos \theta \vec{i} + \sin \theta \vec{j}), \text{ unde } \theta \text{ este unghiul dintre } \vec{w} \text{ și } \vec{i}.$$

Aplicând acest fapt, rezultă:

$$\frac{h \cdot \nu_0}{c} \vec{i} + 0 = \frac{h \cdot \nu}{c} (\cos \alpha \vec{i} + \sin \alpha \vec{j}) + m\nu (\cos \beta \vec{i} - \sin \beta \vec{j})$$

și egalând coeficienții lui \vec{i} și \vec{j} din cei doi membri, rezultă:

$$\frac{h \cdot \nu_0}{c} = \frac{h \cdot \nu}{c} \cos \alpha + m \cdot \nu \cdot \cos \beta \text{ și } 0 = \frac{h \cdot \nu}{c} \sin \alpha - m \cdot \nu \cdot \sin \beta,$$

la care se adaugă legea de conservare a energiei (31).

Cunoscând λ_0 și α , se determină matematic $\lambda = \frac{c}{\nu}$, β și energia cinetică de spațiu. Nu mai dăm detalii.

Modelul prezentat a fost confirmat experimental ca un prim succes al Mecanicii cuantice, pentru care Compton a primit premiul Nobel în 1927.

Pe baza efectului Compton s-a realizat după câțiva ani microscopul electronic, care permite vizualizarea atomilor.

Notă: Constanta $A = \frac{h}{m_0 c}$ se numește **lungimea de undă**

Compton a unui electron și are valoarea $2,43 \times 10^{-12} \text{m}$. Cu notațiile anterioare, se poate arăta că lungimea de undă a fotonului are variația $\lambda - \lambda_0 = A(1 - \cos \alpha)$.

c) Ecuația lui Schrödinger și funcția de undă

Să ne imaginăm o microparticulă închisă într-o incintă cu pereți rigizi, astfel încât coliziunile microparticulei să fie perfect elastice, fără pierdere de energie și mișcarea să fie unidirecționată (ca în figura 6.9).

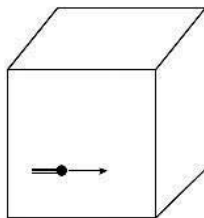


Fig. 6.9

Din punctul de vedere al Mecanicii newtoniene, nu există restricții asupra mișcării particulei; aceasta este în repaus sau „du-te vino” cu orice viteză v ($v < c$).

Deoarece pereții sunt rigizi, impulsul și energia cinetică ale particulei rămân constante și aceasta are un drum predictibil.

Până la 1900, se credea că electronii se comportă similar. Dar acum știm că pentru microparticule, noțiunile de traiectorie sau localizare sunt dificil de definit și de urmărit. Să presupunem că în incinta anterioară, neluminată se află un electron. Pentru a-l localiza, trebuie să luminăm acea incintă. Dar atunci se va modifica impulsul electronului la ciocnirea cu fotonii din lumină.

Este clar că nu se mai poate vorbi de urmărirea traiectoriei, extrem de zig-zagate, a electronului.

Microparticulele au și un caracter ondulatoriu și proprietățile lor – poziție, impuls, energie cinetică sunt descrise cu ajutorul unei ecuații fundamentale a naturii – **ecuația lui Schrödinger**. Pentru o microparticulă cu masa m și viteza v , aceasta este o ecuație complicată cu derivate parțiale (de forma

$$\Delta\psi + \frac{4\pi^2}{\lambda^2}\psi = 0, \text{ unde } \lambda = \frac{h}{mv} \text{ conform relației (28)).}$$

Soluțiile ei, numite funcții **de undă**, sunt de forma:

$\psi(x, y, z, t) \equiv \psi(\vec{r}, t) = A \cdot e^{-i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$; ele descriu starea microparticulei în punctul (x, y, z) și la momentul t ; fără să intrăm în detalii, precizăm doar termenii:

$A = |\psi(\vec{r}, t)|$ este amplitudinea;

$e^{-iu} = \cos u - i \sin u$ (deci $|e^{-iu}| = 1$ dacă u este real);

$$\omega = 2\pi\nu = 2\pi \frac{E}{h} \text{ și } \vec{k} = \frac{2\pi}{h} \vec{p}.$$

Notând $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ (numită **constanta Planck redusă**, sau „hașbar”), rezultă: $\psi(\vec{r}, t) = A \cdot e^{-\frac{i}{\hbar}(Et - \vec{p} \cdot \vec{r})}$. Aceasta este o extindere a relației (9) din cazul 1D (Capitolul 5, §2.1).

Studiul ecuației anterioare a fost realizat de fizicianul austriac Schrödinger, care a primit premiul Nobel, în 1933. Prin natura lor, mărimile asociate microparticulelor sunt variabile aleatoare și ele pot fi studiate doar cu metode probabiliste.

Facem o mică digresiune. Pentru o variabilă aleatoare ζ , se poate defini **funcția de densitate**:

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x} \cdot P(\zeta \in [x, x + \Delta x]).$$

Se poate arăta că:

$$p(x) \geq 0, \quad \int_{\mathbb{R}} p(x) dx = 1 \text{ și că pentru orice}$$

$$a < b, \quad \int_{[a,b]} p(x) dx = P(\zeta \in (a, b)).$$

Dacă ζ este o variabilă aleatoare având funcția–densitate $p(x)$, atunci media ei este: $M \zeta = \int_{\mathbb{R}} x \cdot p(x) dx$ și dispersia ei este:

$$D \zeta = M(\zeta^2) - (M \zeta)^2.$$

Dispersia măsoară gradul de „împrăștiere” a valorilor lui ζ în jurul mediei. Cele spuse anterior se extind la funcții–densitate de mai multe variabile.

O proprietate principală a funcției de undă ψ este că $|\psi(\vec{r}, t)|^2$ este o densitate de probabilitate.

Așadar, probabilitatea ca o particulă să fie situată în paralelipipedul: $[x, x + \Delta x] \times [y, y + \Delta y] \times [z, z + \Delta z]$, pe intervalul de timp $[t, t + \Delta t]$ este: $|\psi(\vec{r}, t)|^2 \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$.

Această proprietate generează multe informații relativ la funcția de undă.

d) Principiul nedeterminării al lui Heisenberg

Acest principiu a fost formulat și argumentat în 1927 de fizicianul german Werner Heisenberg, laureat al premiului Nobel (în 1932), unul din fondatorii Mecanicii cuantice, împreună cu Louis de Broglie, Paul Dirac și John von Neumann.

Au existat discuții îndelungi, la care au participat fizicieni, chimiști, matematicieni și chiar filozofi, deoarece acest principiu arată limitele impuse de natură asupra preciziei măsurătorilor simultane ale unor perechi de mărimi fizice (precum poziția și impulsul unor microparticule sau energia și durata în anumite contexte fizice).

Reamintim că, dacă x este o mărime și \bar{x} o valoare aproximativă a ei, iar dacă $|x - \bar{x}| \leq \varepsilon$, atunci se spune că eroarea absolută în formula aproximativă $x \cong \bar{x}$ este cel mult ε ($\varepsilon > 0$ fixat). Mai puțin precis, dar mai sugestiv, se notează cu Δx **incertitudinea** în măsurarea lui x .

PRINCIPIUL INCERTITUDINII (al lui Heisenberg):

„Dacă o particulă aflată pe o axă este în poziția x și Δx este incertitudinea acestei poziții și dacă, în plus, impulsul acelei particule are incertitudinea Δp_x , atunci are loc inegalitatea:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar. \quad (32)$$

(unde $\hbar = \frac{h}{2\pi} \cong 1,055 \times 10^{-34}$ J·s).

Notă: Așadar, dacă măsurăm x cu precizie sporită, atunci scade incertitudinea Δx . Conform inegalității (32), trebuie să crească Δp_x , adică măsura impulsului p_x este mai imprecisă.

Un enunț mai precis se obține luând în considerare produsul dispersiilor vitezei și impulsului.

O explicație/comentariu al principiului ar fi că, pentru a afla cât mai exact poziția, ar trebui folosiți fotoni cu lungimi de undă mai scurte, asociați deci cu impulsuri mari și cu efect mare asupra poziției; folosirea de fotoni cu lungimi de undă mai mari ar avea efect mai mic asupra poziției particulei.

Ideea lui Heisenberg a fost că nu putem face măsurători asupra unui sistem de entități atomice fără să afectăm acel sistem.

Cu cât măsurătorile sunt mai precise, cu atât deranjăm mai mult sistemul!

Principiul incertitudinii se regăsește în diverse contexte legate de conceptele filozofice de determinism mecanicist și determinism statistic. La Newton, dacă la un moment dat știm poziția, viteza și forțele care acționează asupra unei particule, atunci totul este bine determinat; așadar, prezentul determină viitorul și trecutul sistemelor mecanice. S-a extins acest fapt la sisteme sociale, ceea ce a condus la speculații futurologice, „ghicirea viitorului”, „liberul arbitru” etc. La Heisenberg, se poate doar determina probabilitatea unor evenimente, fără a-i concura pe zei. Se spune că Einstein nu accepta raționamentele probabilistice întâlnite la fizicieni ca Boltzmann, Gibbs, Heisenberg, von Neumann etc. și a lansat dictonul: „Dumnezeu nu dă cu zarul!”. O voce i-ar fi răspuns: „Ba, dă!” și alta „să nu îl învățăm noi pe Dumnezeu ce să facă!”.

Exemplu: Presupunem că viteza unui electron și cea a unui glonț sunt măsurate cu incertitudinea $\Delta v = 10^{-4}$ m/s.

Dacă masa glonțului este $m = 20$ g, care sunt impreciziile minime asupra pozițiilor?

Răspuns: Deoarece $p=m \cdot v$, rezultă $\Delta p_x = m \cdot \Delta v_x$.

Apoi conform (32), $\Delta x \cdot m \cdot \Delta v_x \geq \hbar$. Atunci în cazul glonțului,

$$\Delta x \geq \frac{\hbar}{0,02 \times 10^{-4}} = \frac{1,055 \times 10^{-34}}{0,02 \times 10^{-4}} \cong 5,3 \times 10^{-29} \text{ m.}$$

În cazul electronului, masa este: $M_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ și

$$\Delta x \geq \frac{\hbar}{9,11 \times 10^{-31} \times 10^{-4}} \cong 1,16 \text{ m, ceea ce pare surprinzător.}$$

CAPITOLUL 7 - ELEMENTE DE FIZICĂ ATOMICĂ ȘI FIZICĂ NUCLEARĂ

Introducere

În primele capitole, ne-am ocupat de fenomene macroscopice, motivând totuși și studiul sistematic al microcosmosului, începând cu structura intimă a materiei. Argumentul suprem a fost și a rămas acela că FIZICA (\equiv Natura) poate fi înțeleasă și dezvoltată numai în ansamblul ei. De asemenea, nu putem omite că multe din tehnologiile și aparatele devenite bunuri larg accesibile – tomografie, radiologie X, laseri, RMN, microscopie electronică, tehnici nanometrice etc – au la bază achiziții recente ale fizicii moderne.

În acest ultim capitol al cărții, ne vom referi la prezentarea unor concepte, experimente asociate și dezvoltări teoretice sau aplicative referitoare la **fenomene atomice și subatomice/nucleare** semnificative.

Fizica atomică se ocupă în principal de studiul structurii și proprietăților atomilor, ca și de interacțiunile dintre radiații și atomii diverselor substanțe. **Fizica nucleară** studiază structura, proprietățile și transformările nucleelor atomice, precum și interacțiunile nucleare cu efectele lor macroscopice.

Acest domeniu de cercetare este practic nemărginit și am ales doar câteva aspecte, fiind aproape imposibilă o expunere sistematică a numărului imens de rezultate, greu de ordonat, în care se împletesc ipoteze, dileme și certitudini, interpretări și noutăți zilnice.

§1. ATOMII, MĂRIMI CARACTERISTICE

În Capitolul 6, §3 am prezentat pe scurt evoluția concepției atomice asupra materiei din Univers. În acest paragraf, vom descrie modelul modern al atomului, care explică diversele fenomene care au loc la scara atomică.

1.1. Atomii și elementele chimice

Reamintim că atomul conține un nucleu încărcat pozitiv, format din protoni și neutroni, precum și un înveliș de electroni, în jurul nucleului, datorită căruia atomul este neutru electric (Cap. 6, §3.2). Prin procedee chimice, atomul nu poate fi divizat în particule mai simple. Fiecare atom are un număr atomic, notat Z , egal cu numărul electronilor (același cu numărul protonilor) constituenți. Izotopii unui atom au același Z și ei diferă prin numărul de masă A (adică diferă prin numărul de neutroni).

Un atom împreună cu izotopii lui formează o „specie atomică” numită **element chimic** și invers, atomul este unitatea de bază a unui element chimic. Deși sunt concepte apropiate, atomii diferă totuși de elementele chimice, acestea fiind sistematizate exhaustiv în Tabelul periodic al lui Mendeleev.

Exemplu: Atomii care au $Z=6$ formează elementul chimic carbon (C), iar cei cu $Z=92$ formează elementul uraniu (U).

Reamintim că **substanțele** sunt combinații de atomi a două sau mai multe elemente chimice, în anumite proporții; de exemplu, H_2O , $NaCl$, Fe_2O_3 , H_2SO_4 etc. Substanțele au o compoziție proprie și proprietăți specifice; ele sunt formate din atomi, molecule sau ioni (ionii fiind atomi sau molecule care au pierdut unul sau mai mulți electroni).

Reamintim că 1 mol dintr-o substanță este cantitatea din acea substanță care conține tot atâtea particule (atomi sau molecule) câte se află în 12 g de carbon (de fapt, izotopul $^{12}_6\text{C}$), în număr de $N_A \cong 6,023 \times 10^{23}$ - numărul lui Avogadro.

Moleculele sunt grupuri stabile de atomi; ele pot fi monoatomice (ex. Fe, Ni), biatomice (ex. CO, NaCl) sau multiatomice (ex. CO₂, H₂O, masele plastice). Structura macroscopică a substanțelor este o consecință a modului în care se aranjează atomii și moleculele.

Studiul electrolizei sau al efectului fotoelectric, ca și cel al descărcărilor în gaze, a condus la evidențierea electronilor (Thomson, 1897). Mai târziu, s-au determinat sarcina electrică a electronului $q = -e$ (unde $e \cong 1,6 \times 10^{-19} \text{C}$ este unitatea de sarcină), ca și masa electronului $M_e \cong 9,109 \times 10^{-31} \text{kg}$. În studiul radioactivității s-au observat particule cu proprietăți similare cu cele ale electronului (masă, dimensiune, mărimea sarcinii electrice), dar încărcate pozitiv; acestea au fost numite **pozitroni** și au fost prezise teoretic de fizicianul englez Dirac în 1929 și descoperite în 1932 în radiațiile cosmice. Ulterior s-a dovedit că pozitronul este de fapt antipartícula asociată cu electronul.

Deoarece atomul este neutru electric, suma sarcinilor pozitive este egală în modul cu suma sarcinilor negative deci sarcina pozitivă a atomilor este Ze . Dacă un atom își pierde sau câștigă electroni, atunci el se transformă într-un **ion** (pozitiv dacă pierde și negativ dacă atomul respectiv câștigă electroni).

Ionizarea unor atomi este procesul de pierdere sau câștig de electroni, cu transformarea acelor atomi în ioni.

Particulele încărcate electric, aflate în interiorul unui atom, se pot deplasa; „centrul” sarcinilor pozitive nu coincide cu

cel al sarcinilor negative, ceea ce explică existența unor forțe electrice de interacțiune care se alătură forțelor gravitaționale; astfel de forțe se manifestă și printre ioni.

Pentru calcule legate de mase și dimensiuni în domeniul atomic, s-a introdus în SI **unitatea atomică de masă**, notată u (sau **amu**):

$$1 u \cong 1,661 \times 10^{-27} \text{ kg} \quad (1)$$

De fapt,

$$1 u = \frac{10}{6,022} \times 10^{-27} = \frac{1}{6,022} \times 10^{-26} = 10^{-3} \times \frac{1}{6,022 \times 10^{23}} = 10^{-3} \times \frac{1}{N_A}.$$

Pentru exemplificare, indicăm câteva mase și dimensiuni ale unor atomi:

- atomul de hidrogen are masa $1u$ și diametrul de $0,106 \times 10^{-9} \text{ m}$;
- atomul de carbon are masa $1,993 \times 10^{-26} \text{ kg} \cong 12u$ și diametrul $0,150 \times 10^{-9} \text{ m}$;
- atomul de siliciu are masa $4,655 \times 10^{-26} \text{ kg} \cong 28u$ și diametrul $0,235 \times 10^{-9} \text{ m}$.

Definind $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm} = 10^{-10} \text{ m}$ (Ångström), reținem că diametrele atomilor menționați sunt de circa 1-2 Å, evaluări obținute în Cap. 2, §1.2.

Pentru a descrie energia microparticulelor, se utilizează **electronvoltul** eV; 1eV este energia dobândită de o sarcină elementară e , accelerată de o diferență de potențial de 1V, deci:

$$1 \text{ eV} \cong 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}.$$

Electronvolții sunt utilizați în Fizica atomică, unde energiile de legătură ale atomilor sunt de ordinul a 1eV; dar în Fizica nucleară, energiile de legătură ale nucleelor sunt de ordinul a 1 MeV $\cong 10^6 \text{ eV}$.

1.2. Modele istorice ale atomilor

În Cap. 6, §3.1, am descris percepțiile timpurii și oarecum naive asupra atomilor, inclusiv modelele succesive, care au avut meritele și limitele lor. Acum le reluăm în mod mai riguros, arătând cum s-a ajuns la modelul cuantic actual.

Conform **modelului lui Dalton**, pentru fiecare substanță atomii sunt neutri electric, au forme sferice, congruente între ele, omogene și capabile de ciocniri elastice. S-au putut astfel explica difuzia și modificarea stării de agregare odată cu creșterea temperaturii, dar nu și fenomenul razelor catodice sau al spectrelor de emisie.

Modelul lui Thomson a prezis că atomul ar fi o sferă în care sarcinile pozitive și electronii au o repartitie uniformă și că mișcarea fiecărui electron este de tipul mișcării circulare uniforme, unde proiecția electronului pe orice diametru ar fi o oscilație armonică având frecvențele cât cele ale radiației electromagnetice; această ultimă predicție nu s-a confirmat.

La începutul secolului al XX-lea, **Rutherford** a elaborat „modelul planetar” al atomului, apropiat de cel actual; anume, sarcina pozitivă este concentrată în nucleul atomului, iar electronii se deplasează pe orbite circulare sau eliptice, sub acțiunea forțelor de atracție coulombiene (figura 7.1).

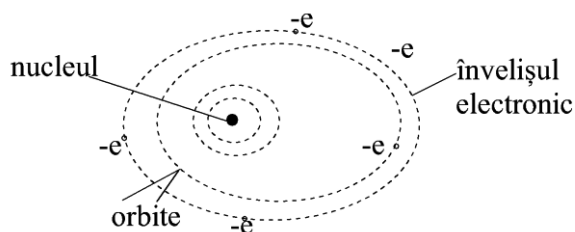


Fig. 7.1

Acest model nu a putut explica stabilitatea atomului și modul cum atomul emite sau absoarbe energie.

Pasul decisiv în clarificarea structurii atomului l-a realizat Niels Bohr care, aplicând rezultatele lui Einstein relativ la fotoni, a elaborat **modelul cuantic** care îi poartă numele. Acest model a consacrat structura discretă a substanțelor și faptul că schimbul energetic atom \leftrightarrow radiație se realizează prin cuante; reamintim că energia și impulsul unui foton depind liniar de frecvența radiației

$$E_f = h \cdot \nu, \quad p_f = \frac{h \cdot \nu}{c} \text{ (deci } E_f = c \cdot p_f) \quad (2)$$

(conform legii lui Einstein din Cap. 6, §2.2 și relațiilor (25), (29) din Cap.6).

Un foton nu poate exista în repaus, nu are sarcină electrică, dar are un moment cinetic intrinsec, anume spinul.

1.3. Postulatele și regula de cuantificare ale lui Bohr

Pentru orice atom fixat, Bohr a formulat două postulate și o regulă de cuantificare (adică de distribuție a valorilor) pentru momentul cinetic, care au fost confirmate experimental:

Postulatul 1: Există un șir de stări ale atomului, numite staționare, în care energiile $E_1, E_2, \dots, E_n, \dots$ nu sunt nici absorbite, nici emise; energia minimă este atinsă pentru $n=1$, în starea numită fundamentală (Stările sunt identificabile cu energiile). Atomul este într-una din stări; electronii gravitează în jurul nucleului pe orbite staționare.

Postulatul 2: Atomul poate emite sau absorbi energie sub forma unui foton, prin tranziție de la o stare E_m la o altă stare E_n : energia fotonului emis (în cazul când $E_m > E_n$) sau absorbit (dacă

$E_m < E_n$) este $E_f = |E_m - E_n|$. În plus, frecvența radiației este $\nu = \frac{E_f}{h}$.

În plus, dacă fotonul este absorbit, atunci el dispare.

Exemplu: Dacă atomul se află în starea fundamentală, adică în starea de energie minimă E_1 și primește energie, el poate trece în orice altă stare E_n cu $n \geq 2$.

Notă: Mișcările electronilor în atom se pot asimila cu mișcări de tip newtonian pe orbite staționare, aproximativ circulare, în jurul nucleului; indiferent de accelerația lor, electronii nu radiază.

Să considerăm un atom și un singur electron. Dacă $m = M_e$ este masa lui, r = raza unei orbite staționare și v = viteza electronului pe acea orbită, atunci condiția de echilibru al mișcării electronului pe orbită este exprimată prin egalitatea dintre forța de atracție coulombiană între nucleu și electron și forța centripetă $m \cdot \frac{v^2}{r}$. Nucleul are sarcina electrică $Z \cdot e$ și conform legii lui Coulomb (cap. 3, §1.2, formula (1)), avem:

$$\varepsilon \frac{Z \cdot e \cdot e}{r^2} = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad (3)$$

(unde $\varepsilon = 9 \cdot 10^9 \text{ m}^2 \cdot \text{N/C}^2$). Odată cu postulatele 1 și 2, Bohr a introdus următoarea:

Regulă de cuantificare: Momentul cinetic orbital (adică produsul $m \cdot v \cdot r$) al electronului pe orbita staționară a n -a este egal cu $n \cdot \hbar$, unde $\hbar = \frac{h}{2\pi} \cong 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$. Deci nu poate lua orice valoare.

Notă: În Mecanica Newtoniană se definește momentul cinetic al unei particule de masă m , legat de rotația particulei în jurul unui punct, ca fiind produsul vectorial $\vec{L} = \vec{r} \times m\vec{v}$, care are

mărimea $m \cdot v \cdot r \cdot \sin \alpha$, unde $\alpha = (\vec{r}, \vec{v})^\wedge$; figura 7.2. În cazul mișcării circulare, $\alpha = \frac{\pi}{2}$ și $\sin \alpha = 1$, deci $L = mvr$.

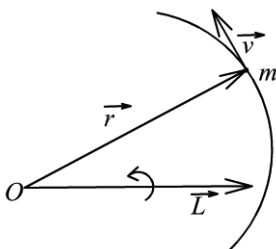


Fig. 7.2

În Mecanica cuantică, particulele (electroni, protoni, neutroni etc.) au și un moment cinetic **intrinsec**, considerat ca o proprietate similară celei de masă sau sarcină electrică; acest moment cinetic se mai numește **spin** și este legat de rotația particulei în jurul axei proprii. Nu intrăm în detalii.

1.4. Calculul mărimilor caracteristice ale unui electron

În acest moment, pornind de la postulatele lui Bohr, putem deduce explicit, în funcție de numărul atomic Z , **valorile mărimilor caracteristice** asociate stărilor staționare ale electronului considerat; mai precis, ale energiei, razei orbitelor, vitezei și perioadei de rotație a electronului pe orbită. Pentru aceasta, conform (3) și regulii de cuantificare, au loc pentru orice $n \geq 1$, relațiile:

$$\mathcal{E} \frac{Z \cdot e^2}{r_n^2} = \frac{m \cdot v_n^2}{r_n} \text{ și } m \cdot v_n \cdot r_n = n \cdot \hbar.$$

$$\text{Înlocuind } v_n = \frac{n \cdot \hbar}{m \cdot r_n}, \text{ rezultă } \frac{\mathcal{E} \cdot Z \cdot e^2}{r_n^2} = \frac{m}{r_n} \cdot \frac{n^2 \cdot \hbar^2}{m^2 \cdot r_n^2}, \text{ de unde}$$

$$r_n = \frac{1}{\mathcal{E}} \cdot \frac{n^2 \cdot \hbar^2}{m \cdot Z \cdot e^2}, \text{ pentru orice } n \geq 1.$$

Pentru $n=1$, $r_1 = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{\hbar^2}{m \cdot Z \cdot e^2}$ deci $r_n = n^2 \cdot r_1$ și totodată,

$$v_n = \frac{1}{n} \cdot v_1, \text{ pentru orice } n \geq 1. \quad (4)$$

Exemplu: Valoarea razei orbitei fundamentale, numită **prima rază a lui Bohr**, se poate calcula explicit; anume:

$$r_1 = \frac{1}{9 \cdot 10^9} \cdot \frac{1}{Z} \cdot \frac{(1,055 \times 10^{-34})^2}{9,109 \times 10^{-31} \times (1,6 \times 10^{-19})^2} \cong \frac{1}{Z} \cdot (5,3 \times 10^{-11}) \text{ m.}$$

În cazul atomului de hidrogen, care are un singur electron, avem $Z=1$ și diametrul atomului este chiar diametrul orbitei fundamentale deci este egal cu $2r_1 = 2 \times 5,3 \times 10^{-11} \cong 10^{-10} \text{ m} \cong 1 \text{ Å}$, rezultat obținut și prin alte considerații.

De asemenea,

$$v_1 = \frac{\hbar}{m \cdot r_1} = \frac{\hbar \cdot Z}{M_e \cdot (5,3 \times 10^{-11})} \cong Z \cdot \frac{1,055 \times 10^{-34}}{9,109 \times 10^{-31} \times 5,3 \times 10^{-11}} \cong Z \cdot (2,2 \times 10^6) \text{ m/s}$$

Așadar, conform (4), rezultă $r_n = n^2 \cdot r_1$ (raza celei de a n -a orbite staționare) și $v_n = \frac{1}{n} \cdot v_1$ (viteza pe cea de a n -a orbită).

În mișcarea circulară uniformă a electronului pe un cerc de rază r , energia potențială E_p este lucrul forței de atracție de către nucleu, deci $E_p = -\varepsilon \cdot \frac{Z \cdot e^2}{r^2} \cdot r$ deci $|E_p| = \frac{\varepsilon \cdot Z \cdot e^2}{r}$.

Se poate arăta că energia totală a electronului pe orbita staționară a n -a este $E_n = -\frac{\varepsilon}{2} \cdot \frac{Z \cdot e^2}{r^2 \cdot n^2}$, deci

$$E_n = \frac{1}{n^2} \cdot E_1 \text{ (pentru } n \geq 1) \quad (5)$$

Exemplu: Energia fundamentală E_1 poate fi calculată explicit:

$$E_1 = -Z \cdot \frac{9 \cdot 10^9 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{2,53 \cdot 10^{-11}} \text{ J} \cong -Z \times 13,6 \text{ eV}.$$

În cazul atomului de hidrogen ($Z=1$), $E_1 \cong -13,6 \text{ eV}$.

Mai departe, conform postulatului 2 al lui Bohr, frecvența radiației electromagnetice în cazul tranziției de la o stare E_m la starea E_n este:

$$\nu_{mn} = \frac{1}{h} |E_m - E_n| \text{ deci, } \nu_{mn} \stackrel{cf.(5)}{\cong} E_1 \cdot \left| \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right|.$$

În cazul când $m > n$, rezultă:

$$\nu_{mn} = Z \cdot \frac{\varepsilon \cdot e^2}{2r_1} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right). \quad (6)$$

Aceasta este numită **formula lui Rydberg**. Ținând cont de formula lui de Broglie (cap. 6, §3.3, formula (29)), lungimea de undă λ_{mn} a radiației electromagnetice în tranziția de la starea E_m la starea E_n este $\lambda_{mn} = \frac{c}{\nu_{mn}}$.

Rămâne să determinăm perioada mișcării electronului pe orbita a n -a staționară. Cu notațiile standard ($\omega = 2\pi\nu$, $\nu = r \cdot \omega$), frecvența este $\nu_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{\nu_n}{2\pi r_n}$ și cum $\nu_n = \frac{1}{n} \nu_1$ și $r_n = r_1 \cdot n^2$ (conform (4)), se obține:

$$\nu_n = \frac{\nu_1}{2\pi r_1 \cdot n^3} \text{ și, în fine,}$$

$$T_n = \frac{1}{\nu_n} = \frac{2\pi r_1 \cdot n^3}{\nu_1};$$

$$\text{deci } T_1 = \frac{2\pi r_1}{\nu_1} \text{ și în final,}$$

$$T_n = T_1 \cdot n^3, \text{ pentru orice } n \geq 1. \quad (7)$$

Notă: Valoarea minimă a energiei care trebuie transmisă unui electron aflat în starea fundamentală (adică pe orbita $n=1$)

este egală tocmai cu energia necesară acestuia pentru a părăsi atomul, adică pentru ca atomul să devină un ion (pozitiv).

Așadar, valorile energiei totale E_n sunt discrete (\equiv cuantizate) și corespund stărilor staționare ale atomului.

Totodată, atomul radiază energie electromagnetică atunci când un electron sare de pe o orbită staționară mai depărtată de nucleu pe mai apropiată și, în cazul invers, absoarbe energie.

În viziunea modernă ondulatorie, orbitele staționare nu sunt chiar mișcări ale electronilor.

Modelul lui Bohr a explicat cu succes spectrul hidrogenului a fost confirmat în mare parte printr-un experiment realizat de fizicienii germani J. Franck și G. L. Hertz (în 1914), prin bombardarea atomilor de mercur cu electroni accelerați; s-a dovedit că atomii de mercur au nivele energetice discrete și că radiațiile emise au lungimile de undă λ_{mn} prezise de teorie.

Dar teoria lui Bohr nu a putut explica totul, de exemplu nu s-a putut aplica atomilor cu mai mulți electroni.

§2. CELE 4 NUMERE CUANTICE ȘI PRINCIPIUL LUI PAULI

2.1. Numere cuantice

Pentru completarea modelului atomic al lui Bohr, fizicianul german W. Sommerfeld a introdus **numerele cuantice**, care descriu energiile electronilor din atomi și valorile posibile ale momentelor cinetice și de spin, determinând totodată configurația electronilor în atomi.

Definiția numerelor cuantice

Adoptând modelul lui Bohr, starea unui electron este determinată de următoarele 4 numere, numite **cuantice**:

- Numărul cuantic **principal**, notat cu n , care determină nivelele energetice.

- Numărul cuantic **secundar**, notat cu l ; acesta este un număr întreg care determină forma orbitelor. În plus, pentru n fixat, au loc inegalitățile $0 \leq l \leq n-1$ și există cel mult $2(2l+1)$ electroni. [Bohr a arătat că momentul cinetic orbital are valorile discrete $p = \sqrt{l(l+1)} \cdot \hbar$].

- Al treilea număr cuantic este notat cu m ; el este un număr întreg care determină orientarea în spațiu a orbitei într-un câmp magnetic exterior; anume, proiecțiile momentului cinetic pe direcția câmpului magnetic au mărimea de forma $m \cdot \hbar$, unde $m \in \mathbb{Z}$ și $-l \leq m \leq l$. [Așadar, m poate lua cel mult $2l+1$ valori; pentru $l=0$, avem $m=0$ și pentru $l=1$, $m \in \{-1, 0, 1\}$].

- Electronul are și **momentul cinetic de spin** \vec{S} , acesta având mărimea $\frac{\sqrt{3}}{2} \hbar$; proiecțiile vectorului \vec{S} pe direcția câmpului magnetic exterior au mărimile $\frac{1}{2} \hbar$ și $-\frac{1}{2} \hbar$. Cel de-al patrulea număr cuantic este **spinul** său, s , care are doar valorile $-\frac{1}{2}$ și $\frac{1}{2}$.

Exemplu: Indicăm orbitele posibile ale electronului în atomul de hidrogen pentru câteva numere cuantice. În cazul $n=1$, avem fig. 7.3,a); în cazul $n=2$, avem $l=1$ sau $l=0$ și situația din fig. 7.3,b); în cazul $n=3$, avem $l \in \{0, 1, 2\}$ și situația din fig. 7.3,c).

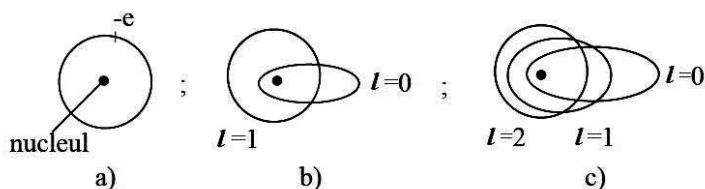


Fig. 7.3

Principiul lui Pauli este o lege de organizare a materiei; el indică modul cum atomii își împart electronii și modul cum se creează configurațiile subatomice.

PRINCIPIUL LUI PAULI DE EXCLUZIUNE:

„Electronii unui atom se comportă astfel încât, într-o stare dată a atomului, se află un singur electron. Dacă doi electroni au aceleași prime trei numere cuantice ***n, l, m***, atunci spinul lor diferă.”

Deci, un singur electron al atomului are același 4-uplu (***n, l, m, s***).

Notă: S-a constatat că toate particulele subatomice – electroni, protoni și neutroni - se supun principiului lui Pauli.

Într-un atom, complexul de electroni care au același ***n*** formează un **strat**, iar cel al electronilor având și același ***l*** formează un **substrat**. Straturile care corespund respectiv valorilor ***n=1, 2, 3, 4, ...*** (cel mult 7) se notează respectiv cu ***K, L, M, N, ...***; substraturile se notează cu ***s, p, d, f, ...***, corespunzând respectiv valorilor ***l=0, 1, 2, 3, ...***. Substraturile conțin una sau mai multe orbite, între care există diferențe de energie.

2.2. Proprietățile numerelor cuantice

1. Stratul ***K*** este cel mai apropiat de nucleu și are nivelul energetic cel mai mic. Electronii cu același ***n*** se află la aceeași distanță de nucleu.

2. Cu cât ***n*** este mai mare, cu atât stratul este mai îndepărtat de nucleu și legătura dintre electronii acelui strat și nucleu este mai slabă.

3. Numărul maxim de electroni dintr-un strat având numărul cuantic principal n este egal cu:

$$\sum_{l=0}^{n-1} 2(2l+1) = 4 \sum_{l=0}^{n-1} l + 2n = 4 \frac{n(n-1)}{2} + 2n = 2n^2$$

Pentru $n=1, 2, 3, 4$ acest număr maxim are valorile 2, 8, 18, 32.

4. Pentru $n \geq 1$ fixat, cu cât l este mai mic, cu atât orbita sa este mai alungită și pentru $l=n-1$, orbita este circulară.

5. Indicăm un tabel sintetic cu starea electronilor descrisă prin numerele cuantice n, l, m .

n	l	m	Număr orbitali	$2(2l+1)$	Număr maxim electroni $2n^2$
1	0	0	1	2	2
2	0	0	1	2	8
	1	-1; 0; +1	3	6	
3	0	0	1	2	18
	1	-1; 0; +1	3	6	
	2	-2; -1; 0; +1; +2	5	10	
4	0	0	1	2	32
	1	-1; 0; +1	3	6	
	2	-2; -1; 0; +1; +2	5	10	
	3	-3; -2; -1; 0; +1; +2; +3	7	14	

2.3. Modelul atomic al Mecanicii cuantice

Așa cum am menționat în Capitolul 6, §3.3,a), Louis de Broglie a arătat că electronii și celelalte particule subatomice se comportă atât ca niște corpusculi cât și ca unde, energiile lor variind cu lungimile lor de undă. În locul orbitelor, se consideră **orbitalii**, care sunt regiunile din jurul nucleului unde probabilitatea găsirii unui electron este $\geq 0,9$; orbitalii au forme geometrice complexe, ale căror simetrii au fost desluite recent. Conform principiului lui Heisenberg al incertitudinii (Cap. 6, §3.3, d)), este imposibilă determinarea simultană a poziției și momentului cinetic al unui electron. Mișcarea electronilor are un

caracter ondulatoriu, descris printr-o funcție de undă, iar energia electronilor este cuantificată (având doar anumite valori discrete).

2.4. Explicarea cuantică a tabelului lui Mendeleev

Modelul atomic al Mecanicii cuantice a permis înțelegerea profundă a distribuției electronilor în învelișul electronic al atomilor, în orbitale, substraturi și straturi electronice și implicit înțelegerea definitivă a alcătuirii Tabelului periodic al elementelor chimice; această realizare a început cu Mendeleev și a fost desăvârșită după adoptarea modelului cuantic al atomilor.

În 1869, Mendeleev a construit parțial, în mod empiric, celebrul Tabel periodic, înainte de a cunoaște structura atomului, deci înainte de a se fi descoperit electronii, protonii, numerele cuantice etc. Astăzi știm că Tabelul periodic este ordonat după numărul atomic Z și după nivelele energetice ale atomilor.

Hidrogenul are $Z=1$ și se află la începutul Tabelului; He are $Z=2$, C are $Z=6$, pentru Au, $Z=79$ și uraniul are $Z=92$ etc. Acum se știe că proprietățile chimice ale elementelor sunt determinate de aranjamentul electronilor lor și îndeosebi de electronii de pe stratul exterior. Dacă un electron este eliminat de pe un strat interior, atunci un altul va fi transferat spontan, cu emisie de linii spectrale; lungimile de undă ale acestor spectre sunt determinate de nivelele discrete ale energiei atomilor dintr-o substanță sau alta.

Electronii nu se mai consideră în mișcări pe orbite în jurul nucleului (ca în modelul lui Bohr), ci pe diverse nivele energetice, fiecare electron fiind caracterizat prin cele 4 numere cuantice. În Tabelul lui Mendeleev sunt utilizate doar n (pentru energia electronilor în fiecare orbitală) și l (pentru forma orbitalei).

Elementele sunt așezate în blocuri, în funcție de valoarea lui l . Elementele din aceeași coloană au electronii exteriori dispuși pe orbitale având forme identice și au proprietăți chimice apropiate.

Vă recomandăm să aveți acum în față Tabelul periodic; acesta are 4 blocuri: blocul s (pentru $l=0$) are două coloane (coloana I: H, Li, Na,..., Fr); (coloana a II-a: Be, Mg,..., Ra); blocul p (pentru $l = 1$) are 6 coloane (coloana I: B, Al,...; coloana a II-a: C, Si,...; coloana a VI-a: He, Ne, Ar,...); blocul d (pentru $l=2$) are 10 coloane și blocul f (pentru $l=3$) are 14 coloane.

Electronii sunt distribuiți în cadrul atomilor pe straturi, substraturi și orbitale. Așa cum am spus, n dă nivelul energetic al unui electron, l determină substratul pe care se găsește electronul (s , p , d sau f). În cadrul fiecărui strat, primul substrat „ s ” constă dintr-o singură orbitală; al doilea substrat „ p ” constă din max. 3 orbitale, apoi „ d ” din 5 și „ f ” din max. 7 orbitale. De regulă, pentru n dat avem n substraturi și n^2 orbitale; un strat poate conține max. $2n^2$ electroni și un substrat, max. $2(2l+1)$ electroni.

Conform principiului lui Pauli, pe un orbital încap maxim doi electroni, având spinuri de semn contrar.

Nu intrăm în alte detalii, care revin Chimiei.

§3. SPECTRE ATOMICE

Cuvântul „spectru” apare în diverse situații; de regulă, se folosește termenul de **spectru de valori** ale unei anumite mărimi. Astfel, am întâlnit spectrul electromagnetic în Cap. 5, §4.4, care cuprinde ansamblul radiațiilor electromagnetice de diverse frecvențe și implicit, clasificarea acestora; mai precis, spectrul radiațiilor emise de o anumită sursă reprezintă distribuția lor pe diverse lungimi de undă, ca și intensitatea acelor radiații.

În mod similar, se poate considera spectrul numărului $N(\lambda)$ de fotoni emiși de o sursă de lumină în fiecare interval $(\lambda, \lambda + d\lambda)$. Ca un exemplu matematic, dacă avem o funcție $f: A \rightarrow \mathbb{R}$, în loc de a vizualiza graficul lui f , se poate considera spectrul (\equiv mulțimea) valorilor $f(x)$ pentru $x \in A$; de exemplu, spectrul valorilor funcției „sin” este intervalul $[-1, 1]$.

3.1. Linii spectrale ale unui atom

Am văzut că lumina albă este dispersată, la trecerea printr-o prismă optică, în culorile componente, formând ceea ce se numește descompunerea spectrală a luminii. Ca sursă de lumină, se pot folosi tuburi cu descărcări în gaze rarefiate. Un spectroscop cu prismă are o fantă, un dispozitiv de concentrare a fascicolului incident de lumină, o prismă optică și o lunetă de observare a imaginilor fantei pe un ecran, sub forma unor linii verticale separate (numite **linii spectrale**) sau regiuni luminoase – **benzi spectrale**, alternate cu spații întunecate. Spectrele astfel obținute se numesc **spectre de emisie**. Acestea sunt continue în cazul metalelor incandescente și sunt linii sau benzi în cazul gazelor monoatomice.

Exemplu: Dacă un curent electric trece printr-un gaz, acesta emite o culoare caracteristică; o aplicație a acestui fenomen o constituie firmele de neon. Fiecare gaz emite o lumină de o culoare particulară.

Se observă linii spectrale și atunci când lumina albă trece printr-un gaz rece; acestea nu apar ca linii strălucitoare ci ca linii întunecate în spectrul curcubeu continuu al luminii albe (lumina lipsind în anumite linii înguste).

Aceste lungimi de undă sunt absorbite sau împrăștiate de gaz pentru a forma **spectrul de absorbție**.

Exemplu: Dacă luăm o lampă de vapori de sodiu și dacă proiectăm lumina pe flacăra unui arzător cu gaz, flacăra nu va lăsa umbră pe un paravan aflat în poziție simetrică cu lampa în raport cu arzătorul. Dar dacă se pune pe flacăra o sită cu sare de sodiu, atunci flacăra devine galbenă și vedem umbra flăcării, ceea ce arată că vaporii de sodiu absorb radiațiile emise.

Fizicienii au căutat explicații privind emisia de lumină de către atomi. **Liniile spectrale ale atomilor** sunt de fapt traiectorii reprezentând tranzițiile succesive ale electronilor între diferite nivele energetice. Un electron aflat pe cel mai de jos nivel energetic dintr-un atom poate absorbi energia unui foton, sărind pe următorul nivel energetic sau invers, eliberând un foton.

Așa cum am văzut în §2, stările electronice sunt definite prin numerele cuantice.

Exemplu: Fiecare element chimic are o linie spectrală. Astfel, în cazul atomului de hidrogen, la saltul de la nivelul $n=3$ la nivelul $n=2$ se emite o radiație roșie; de la $n=5$ la $n=2$, o radiație albastră și de la $n=6$ la $n=2$, una violet.

Diferitele elemente chimice absorb sau emit lumină doar de anumite lungimi de undă, reprezentate sub forma unor linii spectrale întunecate sau luminoase în cadrul spectrului vizibil. Atomii excitați într-o descărcare în gaze emit un spectru optic caracteristic și în acest mod, fiecare element chimic poate fi identificat după spectrul său.

Aceasta este esența Analizei chimice a elementelor, al cărui prim succes a fost identificarea He în Soare.

Spre sfârșitul secolului al XIX-lea, fizicienii și chimiștii au observat că dacă pentru un element chimic având numărul atomic Z , notăm $T_k = R \cdot \frac{Z^2}{k^2}$ ($k \geq 1$), atunci pentru orice $n \geq 1$ și orice $m \geq n+1$, numerele de undă ale liniilor spectrale sunt de forma:

$$\frac{1}{\lambda_{mn}} = T_n - T_m, \quad (8)$$

fapt care a fost justificat ulterior prin teoria lui Bohr. În cazul atomului de hidrogen, $Z=1$ și R este constanta lui Rydberg având valoarea $R \cong 1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$.

În acest caz, pentru $n \geq 1$ dat, $\frac{1}{\lambda_{mn}}$ variază între:

$$T_n - T_{n+1} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{(n+1)^2} \right) = R \cdot \frac{2n+1}{n^2(n+1)^2} \text{ și } T_n - T_\infty = R \cdot \frac{1}{n^2},$$

deci conform formulei (8),

$$(\lambda_n)_{\min} = \frac{1}{R} \cdot n^2 \text{ și } (\lambda_n)_{\max} = \frac{1}{R} \cdot \frac{n^2(n+1)^2}{2n+1}, \text{ iar } \frac{1}{R} \cong 91 \text{ [nm]}.$$

Exemplu: Pentru $n=1$, lungimea de undă este cuprinsă între 91 și 121 nm, ceea ce corespunde zonei spectrale ultraviolete; pentru $n=3$, lungimea de undă are valori între 820 și 1900 nm (zona infraroșie).

3.2. Spectrul razelor X

Am arătat în Cap. 6, §3.1,c) modul cum Röntgen a descoperit în tubul cu raze catodice radiații penetrante, cu efecte fluorescente, de natură rămasă necunoscută timp de 20 de ani (de aici a rămas și denumirea de „raze X”); s-a constatat apoi că este vorba de radiații electromagnetice cu lungimi de undă în jurul a 1Å , ceva mai mici decât lungimea de undă a razelor ultraviolete.

Există multe surse de raze X, unele fiind naturale precum Soarele și stelele supernove. Cel mai cunoscut dispozitiv este tubul Coolidge (de tip cinescop), unde se realizează proiectarea unui fascicul de electroni de mare energie asupra unor ținte metalice; în incinta acestui tub de sticlă se află doi electrozi – un catod/filament care emite electroni, un anod care accelerează electronii sub o tensiune înaltă U_a (de zeci de mii de volți) și o țintă metalică pe care cad și sunt frânați electronii accelerați.

Energia unui foton, frecvența și lungimea de undă sunt legate prin relația $E_f = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$. Electronii emiși de filament și accelerați la diferența de potențial U_a bombardează anodul în care sunt încetiniți, energia lor transformându-se în căldură sau, parțial, în energie electromagnetică; aceasta din urmă conduce la emisia de raze X. Radiația are o componentă de frânare cu spectru continuu (pe diverse frecvențe sau lungimi de undă), produsă de frânarea electronilor în ținta metalică; radiația anodului are un spectru discret, fiind emisă de atomii excitați prin ciocnire cu electronii din fasciculul incident.

Se știe din Mecanica cuantică faptul că orice sarcină electrică aflată în mișcare accelerată emite o radiație electromagnetică, a cărei intensitate este proporțională cu pătratul accelerației; același lucru îl produc și electronii care bombardează ținta metalică. S-a dedus experimental că lungimea de undă minimă a radiației respective este de forma $\lambda_{min} = k \cdot \frac{1}{U_a}$, unde k este o constantă multiplicativă. Pe de altă parte, energia cinetică a unui electron emis de filament și accelerată de tensiunea U_a este $E_c = e \cdot U_a$. Prin frânarea electronului de un nucleu atomic din ținta metalică, se emite un foton cu energia $h \cdot \nu$ și, deoarece $\nu = \frac{c}{\lambda}$,

rezultă că, $\lambda_{min} = \frac{c}{\nu_{max}}$, deci $\frac{c}{\nu_{max}} = k \cdot \frac{1}{U_a}$. Dacă electronul își pierde toată energia cinetică prin emisia unui foton, atunci $h \cdot \nu_{max} = e \cdot U_a$, de unde rezultă valoarea lui k , anume $k = \frac{c \cdot h}{e}$. Prin diferențe de potențiale de 10 kV, lungimea de undă atinge 1 Å, deci o radiație de undă scurtă, care are capacitate de pătrundere. Tocmai aceasta este radiația Roentgen.

Notă: Reamintim că radiațiile X se propagă în vid cu viteza luminii, că nu sunt deviate de câmpul electric sau magnetic și că deși invizibile, impresionează placa fotografică. Razele X pătrund în diverse substanțe opace la lumină (precum corpul uman), distrugând unele celule organice, dar putând fi foarte nocive în lipsa precauțiilor. Pe un film fotografic sau pe un ecran fluorescent, se obțin imagini ale oaselor, care absorb cel mai bine razele X. Razele X sunt de asemenea folosite în Cristalografie pentru decelarea unor defecte, ca și în controlul vamal.

§4. STRUCTURA NUCLEULUI ATOMIC

Așa cum am mai spus, **Fizica nucleară** studiază structura și proprietățile nucleelor atomice, ca și efectele macroscopice ale transformărilor acestora.

4.1. Numere atomice și numere de masă ale nucleelor

Nucleul oricărui atom ocupă zona centrală a acestuia și este încărcat cu întreaga sarcină pozitivă a atomului. Nucleul este alcătuit din două tipuri de particule stabile – **protoni** și **neutroni**, care împreună sunt numite **nucleoni**. După ce Thomson a descoperit electronul în 1897, Rutherford a descoperit protonii (în 1911) și Chadwick – neutronii (în 1932). Reamintim că pentru

orice atom sau element chimic X, se notează cu Z numărul său atomic (adică numărul de electroni încărcăți cu sarcina $-e$, egal cu numărul protonilor având sarcina $+e$) și cu A numărul de masă (adică numărul tuturor nucleonilor componenți ai lui X); Cap. 6, §3.2. Așadar, numărul neutronilor este $N=A-Z$.

Se scrie simbolic: ${}_Z^AX$ (sau X_Z^A).

Același simbol se utilizează pentru nucleele atomilor respectivi. Ca atare, sarcina electrică a nucleului are mărimea $Q=Z\cdot e$. Datorită neutralității atomului, învelișul electronic al acestuia are sarcina $-Z\cdot e$.

Exemple:

1) Pentru atomul de hidrogen este simbolul ${}_1^1\text{H}$ (cu doi nucleoni și nici un neutron) și pentru atomul de azot ${}_7^{14}\text{N}$ (cu 7 electroni, 7 protoni și 7 neutroni).

2) Nucleele de heliu (numite și helioni sau particule α) se notează ${}_2^4\text{He}$.

3) Sarcina electrică a nucleului de uraniu este:

$$Q=92\cdot e \cong 92\times 1,6\times 10^{-19} \cong 1,5\times 10^{-17}\text{C}.$$

Notă: Am mai arătat că masa electronului este $M_e\cong 9,11\times 10^{-31}\text{kg}$ și că masa protonului este $M_p\cong 1,673\times 10^{-27}\text{kg} \cong 1,0073\text{u}$ deci $M_p\cong 1837 M_e$.

Protonii au numărul cuantic de spin $\frac{1}{2}$.

Neutronii nu au sarcină electrică și masa unui neutron este $M_n \cong 1,675\times 10^{-27}\text{kg} \cong 1,0087\text{u}$ ($M_n\cong 1839 M_e$); spinul este tot $\frac{1}{2}$.

Conform modelului atomic al lui Rutherford, atomul are forma indicată în figura 7.1. Înainte de anul 1900, atomul era

asimilat cu o particulă solidă, dar recent s-a stabilit că nucleonii au o structură proprie și ca atare, nu sunt particule indivizibile.

Recent, s-a demonstrat că nucleonii sunt formați din particule cu sarcini fracționare ($\pm \frac{e}{3}$ sau $\pm \frac{2e}{3}$), numite **quarci**.

Determinarea efectivă a maselor M_e, M_p, M_n ale particulelor din atom (indicate în tabelul din Cap. 6, §3.2) s-a realizat în mod indirect; de exemplu, pentru M_p s-a folosit mișcarea protonilor în câmpuri electrice, iar M_n s-a determinat în urma unor ciocniri de particule în acceleratoare.

Protonii sunt particule stabile, dar un neutron aflat în stare liberă, nu (vom vedea că el se transformă într-un proton, un electron și un antineutrino).

Definiție: Fixăm numerele naturale Z, N (ele nu iau totuși valori arbitrare). O combinație nucleară având Z protoni și N neutroni se numește **nuclid** pentru acei Z și N .

Nucleele atomice sunt nuclizi; dar invers, nu.

Reamintim că elementele chimice și atomii respectivi au același Z , dar pot diferi prin A .

Nuclizii se clasifică în:

- **izotopi** dacă au același Z , dar diferă prin A (deci au numere diferite de neutroni);

Exemplu: Hidrogenul ușor ${}_1^1\text{H}$, deuteriul ${}_1^2\text{H}$ și tritiul ${}_1^3\text{H}$ sunt izotopii hidrogenului.

Unul din izotopii cărbunelui este ${}^{12}_6\text{C}$. [Este interesant că Thomson a descoperit că nucleele atomilor de neon aveau mase diferite și așa s-a ajuns la izotopii aceluiași element chimic].

- **izotoni** dacă au același N , dar diferă Z ;

Exemplu: ${}_1^3\text{H}$ și ${}_2^4\text{He}$ sunt izotoni.

- **izobari** dacă au același A , dar diferă prin Z ;

Exemplu: $^{59}_{26}\text{Fe}$ și $^{59}_{28}\text{Ni}$.

- **izomeri** dacă au același Z și același N , dar au proprietăți fizice diferite, magnetice sau ca timp de viață.

Exemplu: $^{80}_{35}\text{Br}$ are doi izomeri.

Notă: În natură se află toate elementele cu $1 \leq Z \leq 92$ (începând cu hidrogenul și încheind cu uraniul), cu excepția elementelor cu valorile $Z=43$ și $Z=61$, obținute artificial.

Elementele cu $Z \geq 93$ se numesc **transuraniene**. Pe măsură ce Z crește, numărul neutronilor îl depășește pe cel al protonilor, tinzând către raportul $N/Z \cong 1,6$. Numerele din mulțimea $M = \{2, 8, 20, 28, 50, 82, 126\}$ se numesc **magice**. S-a constatat că atomii pentru care $Z \in M$ și $N \in M \cup \{184\}$ sunt foarte stabili. De asemenea, atomii cu $Z \in \{2, 8, 18, 32\}$ sunt stabili.

Exemple de nuclee magice: ^4_2He , $^{16}_8\text{O}$, $^{40}_{20}\text{Ca}$, $^{48}_{20}\text{Ca}$, $^{48}_{28}\text{Ni}$.

Actualmente se cunosc peste 1000 de izotopi artificiali produși, dintre care 245 sunt stabili.

4.2. Dimensiunea și masa nucleelor

- Diametrul nucleului unui atom este de circa 10^{-13} cm, fiind de 10^4 ori mai mic decât diametrul atomului.

Exemplu: Nucleul uraniului are 18 fm ($1 \text{ fermi} \equiv 10^{-15} \text{ m}$).

- Volumul nucleului este de peste 10^{15} ori mai mic decât volumul atomului; ca atare, atomul este mai mult gol.

- Masa nucleului este:

$$M_N = Z \cdot M_p + (A - Z) \cdot M_n \cong Z \times 1,0073u + (A - Z) \times 1,0087u \cong A \cdot u.$$

- Raza protonului (egală cu cea a neutronului) este $r_0 \cong 1,45 \text{ fm}$ și raza unui nucleu este $R \cong r_0 \times A^{\frac{1}{3}}$.

- Densitatea nucleului este:

$$\rho_N = \frac{M_N}{V} = \frac{A \cdot u}{(4\pi/3) \cdot R^3} = \frac{3A \cdot u}{4\pi(r_0^3 \cdot A)} \cong \frac{3 \times 1,661 \times 10^{-27}}{4\pi \times 1,45^3 \times 10^{-45}}$$

și după calcul, $\rho_N \cong 1,3 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$. Densitatea nucleului unui atom este imensă (de peste 10^{13} ori mai mare decât densitatea fierului $\rho_{\text{Fe}} \cong 7800 \text{ kg/m}^3$).

- Considerând un atom cu masa M_a , energia W de legătură a electronului în acel atom și masa de repaus M_{0N} a nucleului respectiv sunt:

$$W \cong 15,7 \times Z^{7/3} \text{ eV și } M_{0N} = M_a - Z \cdot M_e + \frac{1}{c^2} W.$$

- Momentul cinetic intrinsec I al nucleului (numit și **spinul nuclear**) depinde de numărul nucleonilor componenți.

Exemple: Pentru ${}^6_3\text{Li}$, avem $I = 1 \cdot \hbar$; pentru ${}^{15}_7\text{N}$, $I = \frac{1}{2} \cdot \hbar$ și pentru ${}^{14}_7\text{N}$, $I = 0$. În general, spinul nuclear nu depășește câțiva \hbar .

- Forma nucleelor este de „sferă”, „țigaretă” sau „pară”, după posibilitatea ca nucleul să se fragmenteze spontan după ciocnirea cu alt nucleu sau de interacțiunea nucleonilor cu cei periferici.

4.3. Defect de masă

Energia de repaus a unui nucleu este $E_0 = M_{0N} \cdot c^2$, unde M_{0N} este masa de repaus a nucleului.

Energia de legătură (E_{leg}) a nucleului se definește ca fiind lucrul necesar pentru desfacerea în nucleoni componenți a unui nucleu izolat, aflat în repaus, așadar:

$$E_{\text{leg}} = (Z \cdot M_{0p} + (A - Z) \cdot M_{0n}) \cdot c^2 - E_0. \quad (9)$$

Pentru nucleele având un număr mare de nucleoni, E_{leg} este mai mare. Raportul $\mathcal{E} = \frac{E_{leg}}{A}$ se numește **energia de legătură per nucleon**.

Exemplu: Se poate demonstra că \mathcal{E} este maximă local pentru nucleele $^{12}_6\text{C}$, $^{16}_8\text{O}$, care sunt foarte stabile și cea mai mare valoare, anume $\mathcal{E} \cong 8,8 \text{ MeV}$, este atinsă pentru $A=60$; spre valorile cele mai mari ale lui A , \mathcal{E} scade la $7,6 \text{ MeV}$. Dependența lui \mathcal{E} de A este indicată în figura 7.4. Condiția de stabilitate a nucleului este $E_{leg} > 0$.

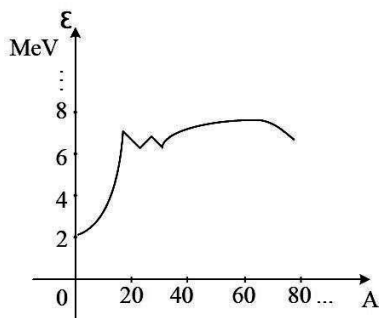


Fig. 7.4

Definiție: **Defectul de masă** al nuclidului cu Z, N dați este:

$$\Delta = M_{0N} - [Z \cdot M_{0p} + (A-Z) \cdot M_{0n}] \quad (10)$$

exprimat în unități de masă u (definite în (1)). Așadar, defectul de masă este diferența dintre masa de repaus a nucleului și suma maselor de repaus ale componentelor sale (protoni și neutroni), considerate separat.

Exemplu: Se poate arăta că pentru elementele chimice ușoare, $\Delta > 0$; apoi $\Delta < 0$ pentru $10 < Z < 72$ și din nou $\Delta > 0$ pentru $Z \geq 73$. Conform (9), rezultă că $E_{leg} = -\Delta \cdot c^2$.

4.4. Forțele nucleare

Existența defectului de masă este datorată forțelor nucleare care, în momentul formării nucleului, conduc la eliberarea unei energii egale cu energia de legătură a nucleului; vom vedea că tocmai acest fapt a condus la descoperirea energiei nucleare.

În nucleu, forța de respingere dintre doi protoni este de circa 10^8 ori mai mare decât forța de atracție dintre electroni și nucleu. Doi protoni aflați la distanța de 1 fm se resping cu o forță de circa 2 N. Dar nucleonii sunt legați în interiorul nucleului prin niște forțe de interacție, numite **forțe nucleare**. Acestea sunt forțe de atracție de zeci și sute de ori mai puternice decât forțele electrice (de respingere pentru protoni) și de 10^{31} ori mai puternice decât forțele gravitaționale; de exemplu, forța gravitațională între două nuclee este de circa 2×10^{-26} N.

Forțele nucleare nu sunt de natură electrostatică (fiind forțe neutron–neutron sau neutron–proton). Interacțiile dintre nucleoni se numesc **interacții tari**.

Dăm o listă de **proprietăți ale forțelor nucleare**:

- Au o rază mică de acțiune, de circa 1 fermi ($1 \text{ fm} \equiv 10^{-15} \text{ m}$); la distanța sub 0,7 fm, forțele nucleare sunt de respingere și la peste de 2 fm, acțiunea lor este neglijabilă. Ca atare, un nucleon reacționează doar cu vecinii mai apropiați.
- Nu depind de sarcina electrică, fiind aceleași pentru protoni și neutroni; ele acționează și între neutroni (care nu au sarcină electrică).
- Nu sunt forțe centrale (nefiind orientate pe vectorul de poziție și de mărime invers proporțională cu pătratul distanței); ele au o componentă depinzând de distanță, una depinzând de

spinul intrinsec și alta depinzând de curbura traiectoriei nucleonilor în vecinătatea altor nucleoni.

- Pentru a estima mărimea forțelor nucleare, se apelează la principiul incertitudinii al lui Heisenberg (Cap. 6, §3.3, d).

Exemplu: Să presupunem că avem un nucleon localizat în interiorul nucleului, deci la o nedeterminare a poziției de circa $r_0=1$ fm. Atunci impulsul minim al acelui nucleon va fi $M_p \cdot v \cong \hbar/r_0$, iar energia cinetică a lui va fi:

$$E_c = \frac{M_p \cdot v^2}{2} = \frac{1}{2} M_p \left(\frac{\hbar}{r_0 \cdot M_p} \right)^2 = \frac{\hbar^2}{2r_0^2 \cdot M_p} \cong$$

$$\cong \frac{(1,055 \times 10^{-34})^2}{2 \times (10^{-15})^2 \times 1,673 \times 10^{-27}} \cong 33 \times 10^{-13} \text{ J}$$

Deoarece $1\text{MeV}=10^6\text{eV}=1,6 \times 10^{-13}\text{J}$, rezultă $E_c \cong 20\text{MeV}$. Energia potențială a unui nucleon aflat în câmpul de forțe al celorlalți nucleoni va fi mai mare decât 20 MeV, deci nucleonul este puternic legat în nucleu.

În 1935, fizicianul japonez Yukawa a arătat că forțele nucleare permit nucleonilor să se schimbe între ei, generând particule instabile, pe care le-a numit mezoni (deoarece au masa cuprinsă între masa electronului și cea a nucleonului). Mezonii se mai numesc **pioni** și sunt notați cu π^+ sau π^- .

4.5. Radioactivitatea și tipurile de dezintegrări

Nucleele stabile își mențin, în timp, structura și proprietățile. Celelalte sunt supuse fie radioactivității naturale, fie unor reacții nucleare. Dacă instabilitatea nucleului provine de la tranziția de la un nivel energetic la altul și dacă nucleul absoarbe sau emite o anumită energie, atunci el își menține în acel proces

identitatea A_ZX , conservându-și energia, impulsul, sarcina electrică și spinul.

Definiție: **Radioactivitatea naturală** este fenomenul de emisie spontană de particule provenite din nucleu.

Ca efect nuclear, radioactivitatea a fost descoperită înaintea descoperirii nucleului!

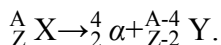
Acest fenomen a fost descoperit de francezul H. Becquerel în 1896, legat de nuclee grele precum uraniul, care se dezintegrează cu formare de nuclee noi, mai stabile și cu emisie de radiații nucleare (care sunt particule aflate în mișcare – electroni, protoni, neutroni, pozitroni, fotoni etc.). De fapt, Becquerel a lăsat câteva plăci fotografice, ferite de lumină, în apropierea unei bucăți de minereu de uraniu, pe care le-a găsit înnegrite, ca și când ar fi fost expuse la lumină; el a dedus că uraniul emite niște radiații necunoscute. După câțiva ani, soții Marie și Pierre Curie au descoperit că Thoriul și Radiul sunt, de asemenea, radioactive și că nu contează condițiile fizice externe.

Ulterior, fizicienii și chimiștii au realizat și **radioactivitatea artificială**, unde radiațiile apar fie din dezintegrarea nucleelor grele, fie din ciocnirea nucleelor cu particule nucleare accelerate.

Se cunosc trei tipuri de radiații emise de nucleele radioactive: α , β , γ . Dezintegrările α și β conduc la schimbarea structurii nucleului (identității sale), în timp ce radiația γ preia excesul de energie din nucleu. Dar să le luăm pe rând...

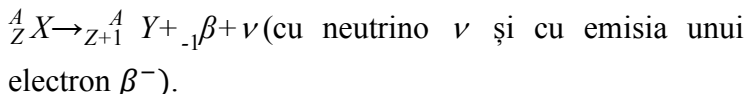
Dezintegrarea α este emisia, realizată de nuclee grele cu $A > 210$, a unor particule alcătuite din doi protoni și doi neutroni, notată ${}^4_2\alpha$. Particula α este de fapt un nucleu de Heliu. Schema

dezintegrării este:



Aceasta înseamnă că prin emisia unei particule α din nucleul X este generat elementul Y situat în Tabelul periodic al lui Mendeleev, plasat cu două locuri mai la stânga lui X, cu numărul de masă având 4 unități mai puțin.

Dezintegrarea β este cea mai răspândită și constă în procesul de transformare spontană a nucleelor instabile ${}^A_Z X$ în nuclee izobare, care se deosebesc prin înlocuirea lui Z cu $Z \pm 1$. Forțele implicate în dezintegrarea β sunt numite forțe nucleare slabe. Schema dezintegrării β este de tipul:



Este de asemenea posibilă capturarea unui electron apropiat de nucleu, dar nu mai dăm detalii.

Așadar, prin emisia unui electron (\equiv radiație β^-) se formează un element situat imediat la dreapta, cu păstrarea numărului de masă; similar, prin emisia unui pozitron (radiația β^+), se formează un element situat la stânga lui X în Tabelul periodic.

Radiația γ este o radiație electromagnetică, având o energie mare și lungimea de undă sub 1 Å; ea este emisă de nuclee aflate în stări excitate. Radiația α nu penetrează foaia de hârtie, iar β traversează o folie subțire metalică. Dar radiațiile γ sunt foarte penetrante și nocive; ele au impus protecția reactoarelor nucleare cu ziduri groase de beton.

Notă: Descoperirea radioactivității a modificat percepția că atomii ar fi „ultimile cărămizi” ale materiei și a restabilit

speranța alchimiştilor privind „transmutanța elementelor”, deschizând era reacțiilor nucleare, de tipul:



4.6. Proprietățile dezintegrării radioactive

1. Dezintegrarea radioactivă nu depinde de condițiile externe (precum temperatura, presiunea, câmpul electric sau magnetic) și nici de reacțiile chimice.

Așadar, emisia de radiații este o proprietate a materiei profunde, anume a nucleelor atomilor substanțelor supuse dezintegrării.

2. Particulele α și γ au valori discrete ale energiei (nu este cazul particulelor β).

3. După dezintegrarea radioactivă, noile nuclee ocupă alte poziții în Tabelul periodic al lui Mendeleev.

Astfel, după o dezintegrare α , numărul atomic se reduce cu 2; iar după o dezintegrare cu un electron (respectiv pozitron), numărul atomic crește (respectiv scade) cu 1.

4. Notăm $N(t)$ numărul nucleelor radioactive existente la momentul t ($t \geq 0$) și fie $N_0 = N(0)$ numărul lor inițial.

S-a constatat experimental că, la fiecare moment t , viteza de descreștere a lui $N(t)$ este proporțională chiar cu cantitatea $N(t)$, adică există o constantă λ ($\lambda \geq 0$), numită **constanta de dezintegrare**, astfel încât:

$$N'(t) = -\lambda \cdot N(t), \text{ pentru orice } t \geq 0 \quad (11)$$

Aici este necesară o digresiune matematică.

Dacă $y(t)$ este valoarea la momentul t a unei mărimi fizice pozitive și dacă $y'(t) = -\lambda \cdot y(t)$, atunci $y(t) = y(0) \cdot e^{-\lambda t}$

[Într-adevăr, $\frac{y'(t)}{y(t)} = -\lambda$ deci $(\ln y(t))' = (-\lambda t)'$, de unde $\ln y(t) = -\lambda t + C$, cu C o constantă. Pentru $t=0$, rezultă $\ln y(0) = C$ deci $\ln y(t) = -\lambda t + \ln y(0)$. Atunci $\ln \frac{y(t)}{y(0)} = -\lambda t$ și ca atare, $\frac{y(t)}{y(0)} = e^{-\lambda t}$].

Aplicând acest fapt, din relația (11) rezultă:

5. LEGEA (dezintegrării radioactive exponențiale):

Avem,

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}, \text{ pentru orice } t \geq 0. \quad (12)$$

Notă: Se poate arăta că valoarea lui λ este egală cu probabilitatea de dezintegrare a nucleului în 1 s, iar $\tau = \frac{1}{\lambda}$ este durata medie de viață a nucleului radioactiv.

6. Să notăm cu T **durata de înjumătățire** a lui $N(t)$; așadar, după T unități de timp (ani, ore sau secunde), cantitatea se înjumătățește, adică $N(t+T) = \frac{1}{2}N(t)$.

Aplicând formula (12), rezultă $N_0 \cdot e^{-\lambda(t+T)} = \frac{1}{2}N_0 e^{-\lambda t}$ de unde $e^{-\lambda T} = \frac{1}{2}$, adică $-\lambda T = \ln \frac{1}{2} = -\ln 2$.

În concluzie, se obține **LEGEA (duratei de înjumătățire):**

$$„\text{Avem, } T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \cdot \ln 2, \quad (13)$$

deci T nu depinde de cantitatea inițială ci numai de natura substanței”.

Deoarece $\ln 2 \approx 0,7$, rezultă că $T \approx 0,7\tau < \tau$.

Iată câteva durate de înjumătățire: Pentru Iod 131–8 zile, Radium–1600 ani, Plutoniul–24 mii de ani, U 238–4,5 miliarde de ani, $^{24}_{11}\text{Na}$ –15 ore și $^{14}_6\text{C}$ –5730 de ani, etc.

7. În cadrul **radioactivității artificiale**, se bombardează atomii cu protoni, neutroni, nuclee de deuteriu, cu elemente grele etc, iar nucleele emit particule β sau raze γ .

Aplicație:

Chimistul american W. Libby (laureat Nobel în 1960) a descoperit o metodă revoluționară pentru „determinarea vârstelor” în Arheologie și Geologie, numită **datarea cu o cantitate de carbon radioactiv** (izotopul $^{14}_6\text{C}$). Toate viețuitoarele păstrează conținutul din acest carbon, în echilibru cu cel existent în atmosferă la momentul morții lor. După ce organismul moare, carbonul se dezintegrează cu înjumătățire după 5730 de ani.

Comparând conținutul de carbon din relicvă cu cel din atmosferă, se poate estima momentul morții. Datarea cu $^{14}_6\text{C}$ nu este utilă dincolo de 40 000 de ani (adică după 7 durate de înjumătățire), deoarece cantitatea de carbon devine prea mică. W. Libby și-a aplicat metoda la datarea manuscriselor de la Marea Moartă, stabilind de asemenea că în America de Nord, prima ființă umană a apărut în urmă cu 27 000 de ani.

§5. INTERACȚIUNEA RADIAȚIEI NUCLEARE CU DIVERSE SUBSTANȚE

Radiațiile sunt invizibile, dar pot produce, de exemplu, încălzirea substanțelor.

De asemenea, deși nu vedem fotonii zburând în cameră, putem resimți interacțiunea lor cu reținele noastre. Fizicienii au reușit să compare, să măsoare și să construiască dispozitive de detecție a radiațiilor.

5.1. Interacțiunea electronilor și pozitronilor

Interacțiunea se realizează prin împrăștierea, elastică sau nu, ca și prin atenuarea radiațiilor. Împrăștierea neelastică este însoțită de ionizarea și excitarea atomilor.

Dacă electronii se ciocnesc de nuclee și sunt decelerați, atunci are loc emisia „radiației de frânare”, pe care am întâlnit-o la generarea razelor X.

Pierderile respective, numite de ionizare și respectiv de radiație, determină lungimea drumului electronilor prin substanță.

Intensitatea unei radiații este, prin definiție, energia care traversează, în unitatea de timp, unitatea de arie plană perpendiculară pe direcția de propagare.

Absorbția electronilor este descrisă printr-o formulă de tipul legii Lambert a radiației (Cap. 5, §4.7, d)); anume:

$$I_d = I_0 \cdot e^{-\mu d}, \quad (14)$$

unde I_0 este intensitatea inițială a radiației electronilor și I_d intensitatea radiației după parcurgerea unui strat de substanță de grosime d ; μ este un coeficient de absorbție, măsurat în cm^{-1} .

5.2. Interacțiunea cu nuclee atomice

Pierderile prin radiație ale nucleelor atomice sunt mai mici decât pierderile de ionizare (determinate de sarcina și viteza particulelor). Un electron și un proton au aceleași pierderi de ionizare, pentru viteze egale. Lungimea drumului unei particule, la aceeași energie, depinde de masa ei, fiind mai mică pentru particule grele.

5.3. Interacțiunea neutronilor

Neutronii interacționează cu nucleele atomice prin forțele nucleare; interacțiunile se realizează prin împrăștiere, elastică sau nu, iar după diverse coliziuni, neutronii pot fi capturați de nuclee.

5.4. Interacțiunea razelor γ cu substanțele

La trecerea radiației γ prin aer, beton sau plumb, se produc, în funcție de lungimea de undă a radiației: ionizarea, efectul fotoelectric sau efectul Compton. De regulă, fotonii γ ai radiației părăsesc fascicolul incident, a cărui intensitate scade.

Atenuarea intensității fascicolului de raze γ urmează o lege de forma (14).

Pentru fotonii cu energia sub 10 keV, interacțiunea se numește **coerentă**; în cazul interacțiunilor necoerente, au loc modificări ale lungimii de undă. Absorbția fotoelectrică, legată de interacțiunea dintre foton și un electron dintr-un atom al substanței, are un grad mai mare de realizare dacă fotonul are o energie care excede energia de legătură a electronului în nucleu.

Mărimea radiației este estimată după ionizarea pe care o produce aerului, numită **doză de iradiere**. Se definesc de asemenea doza absorbită, puterea dozei, doza acceptabilă pentru diverse țesuturi biologice, separat pentru electroni, raze X, raze γ , particule α , protoni, neutroni rapizi etc.

Detectarea radiațiilor nucleare se realizează prin dispozitive specializate: contor Geiger–Müller (camera de ionizare), detectoare cu scintilație, camera Wilson etc.

Radioactivitatea naturală (implicit interacțiunea radiație/substanță) este prezentă pretutindeni pe Pământ și în spațiul cosmic. Alimentele, aerul, vegetația, oamenii și animalele,

diversele obiecte etc. sunt supuse radiației naturale. În timpul exploziilor solare, numărul particulelor care intră în atmosfera Pământului este afectat și suntem cu toții supuși unor doze de iradiere determinabile. Există de asemenea speculații legate de efectele undelor electromagnetice, telefoanelor mobile, ecranelor TV, nămolurilor sau cenușilor radioactive vulcanice etc.

Radioactivitatea poate fi folosită și în scopuri benefice, precum: producerea unor hibrizi, utilizarea diverselor izotopi în medicina preventivă sau curativă și mai ales, producerea energiei nucleare. Sunt însă necesare măsuri de protecție radioactivă prin controlul dozelor absorbite, dar și prin măsuri de igienă individuală – aerisirea încăperilor, spălarea mâinilor, corpului și îmbrăcăminții, evitarea fumatului și șederii nelimitate în fața diverselor ecrane.

Trebuie menționat că în România, ca și în alte țări europene, există o Comisie Națională pentru Controlul Activităților Nucleare (CNCAN).

Aplicațiile laserilor

Termenul „laser” este prescurtarea expresiei ”light amplification by stimulated emission of radiation”. Invenția laserului a fost un mare succes al Fizicii atomice, datorat aprofundării interacțiunii dintre radiație și substanță; mai precis, interacțiunea dintre câmpul magnetic dintr-o cavitate optică rezonantă și un mediu reactiv alcătuit din atomi, molecule, ioni. Mediul respectiv este excitat prin ciocniri, pompaj optic și transfer rezonant de energie, acumulând energie electromagnetică, eliberată prin stimularea emisiei de radiație.

Laserii sunt dispozitive care generează **fascicule coerente** de lumină. Fasciculele laser diferă de lumina incoerentă venită de la Soare sau de la becuri cu incandescență, prin:

- spectrul îngust de lungimi de undă conținute (generând lumină aproape „monocromatică”);
- propagare la distanțe mari, cu mare capacitate de focalizare;
- intensitate puternică.

Maserii sunt similari, dar cu funcționare în domeniul **microundelor**. Nu dăm mai multe detalii.

Notă: Einstein a dezvoltat, la începutul secolului al XX-lea, conceptele de emisie spontană și emisie stimulată; abia după 40 de ani, în 1954, Ch. Townes, N. Basov și Al. Prohorov au realizat primul maser, pentru care au primit premiul Nobel.

România a fost printre primele țări care au abordat cercetarea și dezvoltarea laserilor, prin colectivul condus de profesorul I. Agârbiceanu la Universitatea Politehnică–București.

Printre aplicațiile laserilor în știință, în tehnică și în medicină, care au pătruns în viața social–economică, menționăm spectroscopia laser, holografia, alinierea în domeniul construcțiilor (pe verticală, la poduri sau tunele), optica neliniară (fibra optică, imagologie și transmiterea multiplă a informațiilor), imprimantele, ca să nu vorbim de domeniul militar („războiul stelelor”, „raza morții” pentru rachete de precizie).

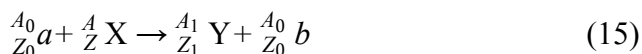
§6. FISIUNEA NUCLEARĂ, FUZIUNEA NUCLEARĂ

6.1. Reacții nucleare

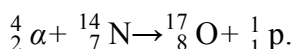
Reacțiile nucleare sunt acele fenomene, prin care fie se modifică spontan structura unor nuclee atomice, fie au loc

ciocniri/interacțiuni cu alte nuclee sau cu alte particule (electroni, neutroni, protoni, fotoni). Prin reacții nucleare au loc transformări de nuclee prin radioactivitate artificială, conducând la formare de izotopi radioactivi.

Reacțiile nucleare se reprezintă simbolic astfel:



Prima reacție nucleară, care a pus în evidență protonul, a fost următoarea:



Definiție: **Energia (\equiv căldura) de reacție Q** într-o reacție de tip (15) este suma energiilor cinetice ale particulelor:

$$Q_n = E_{cin}^Y + E_{cin}^b - E_{cin}^X - E_{cin}^a = (m_a + m_X - m_b - m_Y) \cdot c^2,$$

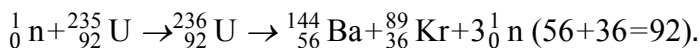
implicând masele de repaus ale nucleelor.

Reacțiile pot fi endoterme (respectiv exoterme) dacă $Q < 0$ (respectiv $Q > 0$).

6.2. Fisiunea nucleară

Definiție: **Fisiunea nucleară** este procesul prin care neutronii, particulele α , protonii sau fotonii γ divid nucleele atomice în mai multe fragmente cu mase comparabile între ele.

Prima reacție de fisiune nucleară stimulată (\equiv nespontană) a fost realizată în 1939 de Hahn, Strassman și Liese Meitner prin bombardarea izotopului ${}_{92}^{235}\text{U}$ cu neutroni lenți, obținând surprinzător bariu și kripton; anume:



Ulterior, s-a observat că nucleul de uraniu poate fi fisat și în alte perechi de elemente. Trebuie menționat că ${}_{92}^{235}\text{U}$ are cel mai mare număr de protoni dintre elementele chimice naturale.

Reacția exotermă anterioară a stat la baza construirii **centralelor termice nucleare**.

Notă: Într-o singură reacție se obțin 200 MeV; 1 gram de uraniu cu toți atomii fisionați ar elibera tot atâta energie cât cea obținută din arderea a 2300 kg carbon.

Un neutron lent poate declanșa fisiunea unui nucleu ${}^{235}_{92}\text{U}$ și după fisiune, se eliberează atât nucleele rezultate, dar și alți neutroni de mare viteză; dacă sunt frânați, de exemplu prin ciocniri cu protoni, ei vor provoca alte fisiuni nucleare, declanșând reacția în lanț, care amplifică mult energiile declanșate. Dacă aceasta nu este controlată, așa cum se întâmplă în bombele atomice, apar cantități imense de energie.

Reactoarele nucleare sunt instalații care realizează reacția de fisiune nucleară a izotopilor unor elemente chimice radioactive grele, cu utilizarea energiei obținute. Primul reactor a fost construit sub asistența lui Fermi în 1942. Reacția de fisiune poate avea loc în lanț, numărul de neutroni generați depășind pe cel al neutronilor absorbiți; este însă necesară asigurarea unei cantități inițiale de material fisionabil, numită **masă critică**.

Exemplu: Pentru ${}^{235}_{92}\text{U}$ masa critică este de 2 kg.

Schema unui reactor nuclear este următoarea:

Material fisionabil → Învelișul protector → Reactorul propriu-zis (ca reflector, moderator≡apă grea, bare de control) → Sistemul de răcire → Sistemul de control și protecție → Schimbătorul de căldură → Turbina de abur → Sistemul de producere și transport al curentului electric (fig.7.5).

Blocul unei centrale nucleare de 1 GW≡ 10^9 W conține ca element combustibil circa 100 t Uraniu, introdus într-o incintă cu apă grea. Apa grea are un dublu scop: să răcească elementele

combustibile (preluând energia eliberată în timpul fisiunii nucleare) și să frâneze neutronii capabili de alte fisiuni.

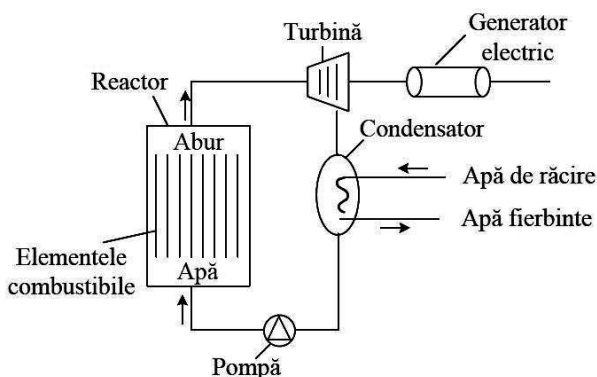


Fig. 7.5

Scopul principal al centralelor nuclear–electrice îl constituie înlocuirea combustibililor fosili (cărbune, petrol, metan) pentru obținerea aburului necesar funcționării rotorului turbinei. De asemenea, în reactoare nucleare se produc izotopi radioactivi artificiali pentru uz medical, industrial sau de cercetare, ca și producerea de plutoniu mai favorabil. Din păcate, nu se pot evita deșeurile radioactive, care pun probleme deosebite de mediu, pe termen mediu și lung.

Prima centrală nuclear–electrică de la Cernavodă funcționează pe sistemul canadian CANDU (Deuteriu – Uraniu), cu o putere instalată de 700 MW și se preconizează realizarea în viitorul apropiat a altor 3–4 reactoare, care ar contribui la obținerea independenței energetice a României. Combustibilul folosit este uraniul natural (de fapt dioxid de uraniu, conținând în proporție de 1%, izotopul $^{235}_{92}\text{U}$), iar moderatorul este apa grea (D_2O), obținută la Halânga, lângă orașul Drobeta Turnu Severin.

6.3. Fuziunea nucleară

Definiție: **Fuziunea nucleară** este reacția nucleară de obținere a unui nucleu greu din contopirea a două nuclee ușoare, cu eliberarea unor energii imense. **Fuziunea termonucleară** are loc la temperaturi foarte înalte, de peste 100 milioane K.

Printre nucleele ușoare, care pot fuziona, se menționează cei trei izotopi ai hidrogenului: hidrogenul ușor ${}^1_1\text{H}$, deuteriul ${}^2_1\text{H}$ și tritiul ${}^3_1\text{H}$, ca și izotopii instabili ai heliului, carbonului sau azotului. Iată cum arată o reacție exotermă de fuziune nucleară:



cu eliberare de energii înalte.

La ora actuală, fuziunea nucleară constituie speranța acoperirii nevoilor de energie (multă și curată!). Au existat recent diverse speculații legate de „fuziunea nucleară la rece, ca și de realizarea rapidă a primelor reactoare de fuziune nucleară. În ciuda unor accidente de tip Cernobîl – 1986 și Fukushima – 2011, fisiunea nucleară este bine controlată, dar nu același lucru se poate spune despre fuziunea nucleară și temperaturile uriașe care o însoțesc. Fuziunea termonucleară a început să fie local utilizată la fabricarea unor arme letale de tipul „bombei cu hidrogen”, unde reacția termonucleară nu este controlată.

Notă: Bomba atomică de la Hiroșima (1945) a folosit ${}^{235}_{92}\text{U}$, iar cea de la Nagasaki ${}^{239}_{94}\text{Pu}$. În interiorul unei bombe atomice, există două mase subcritice de material fisibil, separate și care, printr-o explozie, se unesc generând o masă critică și o reacție în lanț de putere imensă. Efectele exploziilor nucleare sunt undele de șoc, căldură neobișnuită, radiații și depuneri radioactive pe largi suprafețe, cu contaminarea mediului pe mulți ani. Bomba cu hidrogen este amorsată de o bombă

atomică „uzuală”. Bombele „curate” sau cele cu neutroni, cu puteri distrugătoare ale civilizației, sunt dorințe ascunse ale unor militari inconștienți.

6.4. Energetica nucleară

Radioactivitatea a dovedit că nucleele pot fi instabile și a impus întrebarea: de ce stau nucleele împreună? Forțele gravitaționale sunt atractive, dar prea mici în raport cu forțele de respingere dintre protoni. S-a dedus că există forțe puternice, anume cele nucleare, care țin nucleele împreună. Dar fiecare forță este asociată cu o anumită formă de energie.

Exemplu: Un obiect are energie potențială gravitațională datorată forței gravitaționale (utilă la hidrocentrale, cascade etc.). Forța electromagnetică se manifestă prin energie electrică. Apoi când lemnul arde, atomii de C se combină cu cei de oxigen din aer, formând moleculele de CO_2 ; această reacție este exotermă și excesul de energie se transformă în căldură și lumină.

Ceva similar are loc și în cazul forțelor nucleare. Dacă energia configurației finale a nucleonilor este mai mică decât cea inițială, se degajă un exces de energie, prin forma unor particule rapide sau a radiațiilor. Tocmai pentru descoperirea acestor mecanisme a trebuit studiată lumea subatomică.

Civilizația umană s-a dezvoltat pe baza energiei solare, înmagazinată, în timp, sub forma chimică – prin fotosinteză, lemn, apă, vânt, combustibili fosili etc. Pentru omul modern, nu mai este de ajuns. De peste două miliarde de ani, Soarele trimite spre noi un flux imens de energie, dar folosim numai o câtime (10^{-9}) din acest flux. Energia solară radiată timp de 15' echivalează cu energia generată de pământeni timp de 1 an.

Energia Soarelui provine tocmai din nucleele atomilor; în interiorul Soarelui, la temperaturi de multe milioane de grade Celsius, nucleele **fuzionează** și radiația generată este propagată în spațiul cosmic. Deocamdată, pe Pământ s-a practicat în reactoare doar **fisiunea** nucleară. Energia nucleară eliberată la fisiunea unui nucleu de uraniu este de 8×10^9 ori (deci de 8 miliarde de ori) mai mare decât energia cinetică a neutronilor care au provocat fisiunea. Prin arderea a 1 kg C se obțin circa 9 kWh, în timp ce prin fisiunea a 1 kg U rezultă 22×10^6 kWh deci de 22 milioane de ori mai mult. Așadar, 1 t de uraniu produce energie cât 12 milioane de barili de petrol. După unele estimări, rezervele de Uraniu și Thoriu ajung pentru 500 de ani. Prin fuziunea deuteriului cu tritiu, 1 m³ apă echivalează cu 1200 de barili de petrol deci materia primă este practic nelimitată!

§7. CLASIFICAREA PARTICULELOR ELEMENTARE

Istoria omenirii arată o dorință permanentă de a afla elementele de bază ale existenței noastre pe Pământ. La Aristotel acestea erau pământul, focul, aerul și apa. În secolele al XIX-lea și al XX-lea, s-au descoperit cele peste 100 de elemente chimice și s-a descoperit că, în ciuda numelui, atomul este divizibil. În 1932 se descoperiseră 4 constituenți microscopici ai materiei – electronul, protonul, neutronul și fotonul (≡cuanta de lumină). Au urmat antiparticulele, neutrino și multe altele. În acest paragraf, descriem, fără a da justificări teoretice sau experimentale, harta extrem de complexă a lumii particulelor elementare.

7.1. Ce sunt particulele elementare

În mod generic, se numesc **particule elementare** acele particule din natură, care se comportă ca entități individuale în interacțiunile cu alte particule sau cu diverse câmpuri. Înainte de 1970, protonii și neutronii erau considerate particule indivizibile. Astăzi se știe că ele sunt formate din quarci. Proprietățile particulelor elementare sunt exprimate prin diverse caracteristici fizice – masă, sarcină electrică, spin, timp de viață, straneitate etc.

După spinul lor, particulele se clasifică în:

- **bosoni**, având spinul număr întreg (de exemplu, 0 sau 1) și
- **fermioni**, cu spinul semi-întreg ($1/2$).

Spinul este o proprietate intrinsecă, pe care nu o au corpurile macroscopice; el reprezintă un moment cinetic propriu \vec{S} , caracterizat prin numărul cuantic de spin s (conform §2.1).

Așadar, particulele se împart în două tipuri: bosoni și fermioni, denumirile provenind de la numele unor mari fizicieni-indianul Bose și italianul Fermi. Bosonii nu se supun principiului lui Pauli (§2.1), dar fermionii, da; în particular, electronii, protonii și neutronii sunt fermioni.

După masa lor de repaus, particulele se împart în 4 grupe:

- **fotoni** (cu masa de repaus nulă);
- **barioni** (care cuprind particule grele – nucleonii, hiperonii și particulele supergrele);
- **leptoni** (particule mai ușoare – electronii, pozitronii, neutrino);
- **mezoni** (cu masa intermediară).

Fermionii includ leptonii, quarcii și antiparticulele lor.

7.2. Particule și antiparticule

Fiecărei particule elementare îi corespunde o **antiparticulă**; unele antiparticule coincid cu particulele însele

(de exemplu, fotonul). Antiparticula este notată ca și particula, dar cu o bară deasupra; de exemplu, \bar{p} și $\bar{\nu}$ sunt antiprotonul și antineutrino. Antiparticulele alcătuiesc antimateria, dar există întrebări care încă nu au răspuns (de exemplu: există antiatomi?).

Orice pereche particulă/antiparticulă este caracterizată prin trei proprietăți principale:

- o particulă și antiparticula ei au aceleași mase, spini și durate medii de viață;
- produsele de dezintegrare ale unei particule și ale antiparticulei corespunzătoare sunt de asemenea perechi particulă/antiparticulă;
- o particulă și antiparticula ei au sarcini electrice, număr barionic, număr leptonic egale în mărime, dar de semn contrar [Numărul barionic este un număr cuantic, egal cu +1 pentru nucleoni și hiperoni, cu -1 pentru antiparticulele lor și cu 0 pentru mezoni și leptoni; numărul leptonic este +1 pentru leptoni și -1 pentru antiparticulele lor. Numerele barionic și leptonic sunt aditive].

Durata medie τ de viață pentru o particulă depinde de durata de interacțiune, înainte de dezintegrare. Fotonii, electronii, pozitronii, protonii și antiprotonii sunt stabili deci τ este nedefinit, fiind oricât de mare. Pentru neutroni, $\tau \cong 900$ s, dar pentru majoritatea particulelor, durata τ este mai mică decât 10^{-8} s.

7.3. Interacțiuni și transformări ale particulelor elementare

Particulele elementare se întâlnesc în diversele interacțiuni fundamentale din natură – forțele nucleare tari, nucleare slabe, electromagnetice și gravitația. Interacțiunile nucleare tari sunt însoțite de mezoni și apar în procese de împrăștiere și generare multiplă de particule; particulele elementare respective se numesc **hadroni**.

Interacțiunile slabe sunt mediate de bosoni (în special de W și Z la dezintegrarea β).

Interacțiunile electromagnetice sunt mediate de fotoni și de particule elementare încărcate electric, iar cele gravitaționale se manifestă între toate particulele, în funcție de masa lor.

Legile generale de conservare – energie, impuls, moment cinetic, sarcină electrică, număr barionic sau număr leptonic – au loc pentru orice tip de interacțiune. Există însă și legi de conservare cu valabilitate limitată, dar descrierea lor depășește cadrul acestui text.

În urma diverselor interacțiuni, particulele elementare **se transformă unele în altele**. Ne limităm la câteva exemple.

Exemple:

1) După o interacțiune slabă (care este totuși de 10^{26} ori mai puternică decât interacțiunea gravitațională!), un neutron se transformă într-un proton, un electron și un antineutrino:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}.$$

2) După ce Pauli prezisese existența particulei neutrino, după 20 de ani s-a descoperit reacția prin care un antineutrino $\bar{\nu}$ lovește un proton, producând un neutron și un pozitron ($\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$).

Interacțiunea dintre particule și antiparticule, prin transformarea lor în alte particule, se numește **anihilare** (deși **masa** și energia lor pot fi conservate).

Pentru studiul experimental al particulelor elementare sunt utilizate **acceleratoarele** de particule, ciclotroanele, betatroanelor etc. Acceleratoarele sunt instalații cu ajutorul cărora particulele încărcate electric sunt accelerate în câmpuri electrice

sau magnetice până la energii cinetice foarte înalte (de ordinul a sute de GeV).

În ciclotroane, particulele sunt menținute pe traiectorii circulare printr-un câmp magnetic perpendicular pe vectorul-viteză; betatronul este un accelerator ciclic pentru electroni, care ating energii până la 20 MeV, după care sunt proiectați asupra unor ținte metalice, producând radiații de frânare, folosite în medicină sau în defectoscopie.

Lumea științifică urmărește cu interes experimentele cu acceleratorul LHC („Large Hadron Collider”), construit lângă Geneva, în cadrul Centrului european de cercetări nucleare CERN; recent, acolo s-a confirmat existența bosonului Higgs, numit în scop propagandistic „particula lui Dumnezeu”.

7.4. Tabel sintetic conținând unele particule elementare

Prezentăm o sistematizare a câtorva particule elementare. Trebuie menționat că studiul particulelor elementare și al comportării perechilor particule/antiparticulă, este actualmente în plină desfășurare, bazat pe Teoria matematică a grupurilor de transformări și Teoria corzilor („strings”-uri).

Merită amintit numele unor fizicieni, laureați Nobel: americanii Y. Neeman, M. Gell – Mann au studiat quarcii, indianul Bose, italianul E. Fermi, chinezii Wu, Lee, Yang („legile parității”), Yukawa („mezonii”), americanii Feynmann, Glashow, Weinberg, pakistanezul A. Salam.

Există și contribuții ale unor cercetători români (Șt. Procopiu, Al. Proca); menționăm și monografia „Aplicații ale topologiei în fizica particulelor elementare”(autori K. și M. Teleman, Ed. Științifică, 1976). Nu dăm alte detalii.

Particula	Sarcina electrică	Masa repaus MeV	Spin	Număr barionic	Durata de viață	Produse de dezintegrare
Neutron n	0	940	$\frac{1}{2}$	+1	stabil	$e^- + \nu + p$
Proton p	e	938	$\frac{1}{2}$	+1	stabil	–
Mezon π^+	e	140	0	0	$2,6 \times 10^{-8} \text{s}$	$\mu^+ + \nu$
Mezon π^0	0	135	0	0	10^{-18}s	$\gamma + \gamma$
Foton γ	0	0	1	0	stabil	–
Hiperon λ	0	1115	$\frac{1}{2}$	+1	$2,5 \times 10^{-10} \text{s}$	$\pi^+ + p$
Lepton μ^-	$-e$	100	$\frac{1}{2}$	0	$2,3 \times 10^{-6} \text{s}$	$e^- + \nu + \bar{\nu}$
Electron e^-	$-e$	0,51	$\frac{1}{2}$	0	stabil	–
Neutrino ν	0	0	$\frac{1}{2}$	0	stabil	–

În încheierea acestui paragraf, indicăm în figura 7.6 purtătorii de forță în cadrul celor 4 tipuri de interacțiuni menționate:

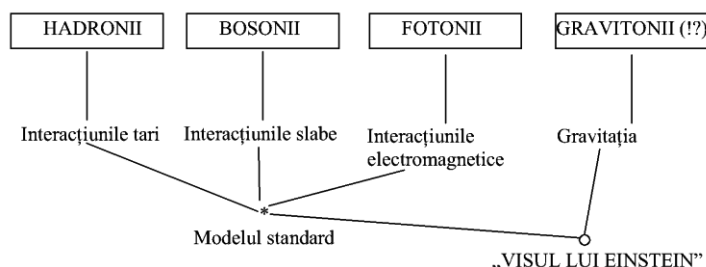


Fig. 7.6

Notă: Toate științele urmăresc tratări unitare ale conceptelor de bază, ca și unificări ale abordărilor. În Matematică, algebra cu geometria au fost unificate prin geometria analitică; analiza cu geometria diferențială etc. și în ultimul timp, se încearcă unificarea cu Informatica.

Tot astfel, ne amintim că Maxwell a arătat că electricitatea și magnetismul sunt două aspecte ale unei forțe comune – **forța electromagnetică**. Aceasta se manifestă pretutindeni în jurul

nostru (atunci când privim lumina stelelor, sau când ascultăm radioul, vorbim la mobil sau privim la TV).

Gravitația dirijează mișcarea planetelor, stelelor sau galaxiilor în Univers. În acest capitol, am prezentat **forțele nucleare tari** (care țin neutronii și protonii legați în nucleu) și **forțele nucleare slabe**, care permit transformarea unor particule în altele, provocând radioactivitatea și apariția nucleelor grele.

„Visul lui Einstein” a fost acela de a găsi un model fizico–matematic care să explice în mod unitar aceste 4 tipuri de interacțiuni.

În 1965, S. Glashow, St. Weinberg și A. Salam au reușit să unifice forța nucleară slabă și forța electromagnetică, iar în 1970, s-a realizat „modelul standard”, incluzând forțele nucleare tari. Nu s-a reușit încă încorporarea gravitației (legată de curbura spațio–timpului, datorată materiei din Univers).

Marea unificare, numită peiorativ „teoria despre orice”, rămâne o provocare permanentă pentru Fizica modernă.

PARTEA A II – A

COMPLETĂRI ȘI ÎNTREBĂRI CU RĂSPUNSURI

CAPITOLUL 6': SALTUL SPRE FIZICA MODERNĂ

○ Ce este un sistem de referință (s.r.)? Dar unul inerțial?

(R) Sistemele de referință (s.r.) se mai numesc „sisteme de coordonate” sau „reper carteziane”.

Mișcarea obiectelor se observă doar în prezența altor obiecte. Se spune că toate mișcările sunt relative.

Un sistem de referință (s.r.) este un set de obiecte despre care se presupune că nu se deplasează unul în raport cu altul, putând fi utilizat pentru detectarea și descrierea mișcării altor obiecte; în plus, este necesar un orologiu pentru marcarea duratelor. De exemplu, Pământul (împreună cu casele, șoselele, stâlpii etc.) poate fi interpretat, în multe situații, ca un s.r. staționar. Dar nu și pentru întregul Univers.

Un s.r. de tipul *Oxyz* este utilizat în descrieri teoretice. S.r. inerțiale sunt cele în care are loc legea I a lui Newton.

Astfel, Pământul este inerțial pentru probleme uzuale – mișcări de căruțe, automobile, avioane, mecanisme.

Un s.r. care se deplasează cu viteză vectorială constantă în raport cu unul inerțial este și el inerțial. Dacă avem două s.r. inerțiale, nu se poate determina care din ele se află în repaus.

S.r. inerțiale se mai numesc **galileiene**; ele se deplasează cu viteză constantă nenulă unul în raport cu altul și originile lor se interpretează ca observatori punctuali.

● Ce afirmă principiul relativității al lui Galilei?

(R) Se presupune existența unui timp universal și a unui reper fix în spațiu. După Galilei, „Legile mecanicii sunt aceleași pentru doi observatori aflați în sisteme de referință inerțiale”.

De exemplu, conservarea masei, conservarea sarcinii electrice, a energiei sau a impulsului etc. sunt adevărate în laborator, într-un vagon care se mișcă rectiliniu și uniform în raport cu solul, în România sau în Brazilia.

Dar legile electromagnetismului nu se conservă, deoarece efectele mutuale ale sarcinilor electrice în mișcare diferă: doi observatori aflați în s.r. galileiene obțin rezultate diferite ale acelor efecte.

● Un obiect este aruncat orizontal cu viteza constantă, \vec{v}_0 , de lângă suprafața Pământului. Dintr-un s.r. staționar relativ la Pământ, traiectoria obiectului este văzută ca fiind parabolică (precum a unui proiectil). Care este forma traiectoriei văzută dintr-un s.r. care se mișcă având viteza \vec{v}_0 ca și obiectul?

(R) Obiectul cade liber, pe verticală.

● Dacă te afli într-un microbuz care se deplasează orizontal și uniform pe șosea cu 5 m/s și arunci în microbuz o minge cu 2 m/s, care va fi viteza mingii în raport cu șoseaua?

(R) 7 m/s dacă mingea este aruncată în sensul deplasării microbuzului și 3 m/s în sens contrar.

Notă: Dacă microbuzul ar merge accelerat, sistemul de referință legat de microbuz nu mai este inerțial și răspunsul nu mai este același.

● Ce se înțelege prin „sus” sau „jos”?

(R) Într-un s.r. inerțial, „sus” înseamnă sens contrar forței gravitației. Pentru astronauti nu există sus – jos.

● Ce sunt forțele inerțiale? Dar imponderabilitatea?

(R) Sunt forțele care apar în s.r. accelerate.

De exemplu, dacă un automobil accelerează brusc, suntem împinși înapoi în scaun. Dacă ne aflăm într-un lift care urcă accelerat având accelerația $-2\vec{g}$, se spune că suferim o forță $2\vec{g}$ (în navele cosmice, astronautii sunt supuși la forțe $6\vec{g}$). Dacă liftul este accelerat în jos cu \vec{g} , se spune că suntem în imponderabilitate și ni se pare că plutim.

Dacă suntem într-o navă cosmică Pământ–Lună, există o zonă unde atracția Pământului este egală cu cea a Lunii și ne aflăm în imponderabilitate (dar nu înseamnă că dispar masa sau gravitația!).

● De ce nu au făcut filosofi observația că “totul este relativ” în timpul lui Newton?

(R) Un răspuns ar fi acela că, înainte ca teoria lui Maxwell a electrodinamicii să fi fost dezvoltată, **nu existau legi fizice** care să sugereze că s-ar putea măsura viteza fără a privi în afară; curând s-a aflat **experimental** că acest lucru nu este posibil.

● Care ar fi consecințele filosofice ale teoriei relativității?

- Totul în gândirea noastră ar putea fi greșit!

- Faptul că ideile “stranii” ne plac sau nu ne plac este o chestiune neimportantă. Ideile “stranii” trebuie să fie în acord cu experiența.

- Simetria legilor fizicii, adică transformarea care lasă forma legilor neschimbată, este o componentă majoră în descoperirile la nivel atomic și subatomic ce s-au făcut și se vor mai face.

● Cum explicați că, uneori, 1+1 face altceva decât 2?

(R) De exemplu, prin faptul că „lumina aflată într-un vehicul, mergând cu viteza c față de vehicul, care la rândul său merge cu viteza c față de Pământ, are viteza c și față de Pământ”.

În teoria relativității restrânse a lui Einstein, trecerea de la un sistem de referință inerțial la altul se face după o transformare Lorentz, care are proprietatea că (unidimensional, spre simplitate):

$$x = \frac{x' + ut'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}, \quad t = \frac{t' + \frac{ux'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

unde x, t sunt coordonatele particulei în sistemul (x, t) , care presupunem că rămâne „nemișcat”, iar x', t' sunt coordonatele punctului în sistemul (x', t') , care se mișcă cu viteza u față de (x, t) , iar cu v și v' vom nota vitezele particulei în sistemele (x, t) , respectiv (x', t') ; considerăm că (x, t) este Pământul, (x', t') o navă care se mișcă cu viteza u față de Pământ și v' viteza cu care se mișcă obiectul din interiorul navei cosmice față de aceasta.

Cu ce viteză se mișcă obiectul față de Pământ?

Înăuntrul navei, obiectul se deplasează pe distanța $x' = v' \cdot t'$. Dar pentru un observator din afară, cu relațiile de mai sus ale lui Lorentz, deplasarea devine:

$$x = \frac{v't' + ut'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}, \quad t = \frac{t' + \frac{v't'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

Făcând raportul dintre x și t obținem:

$$v = \frac{x}{t} = \frac{u + v'}{1 + (u \cdot v' / c^2)}$$

adică viteza obținută este compunerea celor două viteze $(u+v')$ însă afectată de factorul $\sqrt{1+(u \cdot v'/c^2)}$.

Să vedem acum ce se întâmplă dacă:

a) obiectul se mișcă înăuntrul navei cosmice cu jumătate din viteza luminii ($v=\frac{1}{2}c$), iar nava însăși se deplasează cu jumătate din viteza luminii ($u=\frac{1}{2}c$)?

$$\text{Relația devine } v = \frac{\frac{1}{2}c + \frac{1}{2}c}{1 + \frac{1}{4}} = \frac{4c}{5}.$$

Deci, în relativitate, adunând $1/2$ cu $1/2$ nu obținem 1.

b) dar dacă obiectul care se mișcă este însăși lumina, adică $v'=c$, iar nava se mișcă cu viteza c față de Pământ?

$$\text{Atunci } v = \frac{c+c}{1+c \cdot c/c^2} = \frac{2c}{2}.$$

Așadar, lumina se mișcă cu viteza c față de navă, nava se mișcă cu viteza c față de Pământ, rezultă că lumina se mișcă cu viteza c față de Pământ.

Spuneți asta unui filosof și îi veți strica somnul pentru multă vreme.

COMPLETARE:

Despre forțele Coriolis

În sisteme de referință aflate în rotație, apar forțe inerțiale centrifuge și forțe de tip Coriolis; forța Coriolis se resimte dacă ne mișcăm în lungul unei raze a unui sistem aflat în rotație.

De exemplu, dacă ne deplasăm pe podea, de la centrul unui „sistem de călușei” (aflat în rotație), spre exterior, resimțim o împingere în sens opus rotației.

Din cauza forței Coriolis, malurile drepte ale râurilor aflate în emisfera nordică a Pământului sunt mai erodate; în cazul râurilor din emisfera sudică, malurile mai erodate sunt cele stângi (privind în sensul curgerii apelor); similar, mase mari de aer sunt abătute spre dreapta, iar uraganele se rotesc contrar acelor de ceasornic. Acesta a fost un argument puternic că Pământul se rotește în jurul axei NS. Prima demonstrație publică s-a realizat în 1850 cu **pendulul Foucault**.

- Doi observatori se află în s.r. inerțiale diferite și descriu diverse evenimente. Ce diferă în descrierile lor în cadrul fizicii newtoniene?

(R) Diferă traiectoriile obiectelor, valorile vitezelor sau energiilor cinetice (dar coincid lungimile, duratele, masele și forțele, ca și legile dinamicii lui Newton și legile de conservare).

- Ce este un eveniment punctual spațio – temporal?

(R) Un răspuns este: un eveniment care are loc „aici” și „acum”. Matematic, dacă se consideră un reper ortonormal $(R) \equiv Oxyz$ în spațiul \mathbb{R}^3 , se numește **eveniment spațio-temporal** relativ la (R) orice 4-uplu $e = (x, y, z, t) \in \mathbb{R}^4$, unde x, y, z sunt coordonatele poziției acelui eveniment (relativ la acel reper), iar t este momentul la care aceste coordonate au fost măsurate.

- Ce înseamnă evenimente punctuale spațio-temporale fizic conectabile?

(R) Evenimentele $e = (x, y, z, t)$ și $e_1 = (x_1, y_1, z_1, t_1)$ se zic **fizic conectabile** dacă distanța dintre pozițiile lor poate fi parcursă de un semnal trimis de la unul din ele spre celălalt. Aceasta revine la inegalitatea $\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} \leq c \cdot |t - t_1|$, ținând cont că viteza luminii este cea mai mare viteză posibilă.

Poetul nostru național Mihai Eminescu a intuit în poezia „La steaua” că un eveniment de pe Pământ nu este fizic conectabil cu un eveniment care are loc pe o stea îndepărtată.

● Ce este conul viitorului?

(R) Fie $\mathbf{e}_1 = (0, 0, 0, 0)$ și

$$\begin{aligned} C_+ &= \{\mathbf{e} \mid \mathbf{e} \text{ și } \mathbf{e}_1 \text{ sunt fizic conectabile în viitor}\} \\ &= \{(x, y, z, t) \mid t \geq 0 \text{ și } \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \leq c \cdot t\} = \\ &= \{(x, y, z) \mid t \geq 0 \text{ și } x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 \leq 0\}. \end{aligned}$$

Este dificil de reprezentat grafic mulțimea C_+ și se consideră doar secțiunea $y=0, z=0$; așadar, $C_+ = \{(x, t) \mid t \geq 0 \text{ și } x^2 - c^2 t^2 \leq 0\}$, reprezentată în figura 6.1.

Pentru orice eveniment \mathbf{e} , există un con cu vârful în \mathbf{e} , care conține în interiorul său evenimentele fizic conectabile cu \mathbf{e} .

● Care sunt principiile teoriei relativității restrânse („TRR”) einsteiniene?

(R) Nu se presupune existența unui timp universal sau a vreunui reper fix. Cele două principii (\equiv axiome) ale TRR sunt:

I. Toate legile fizicii (inclusiv cele ale electromagnetismului) au aceeași formă în s.r. inerțiale.

II. Viteza luminii în vid este constantă (cu valoarea c) pentru toți observatorii aflați în s.r. inerțiale, independentă de viteza sursei luminoase sau de viteza observatorului care o măsoară.

● Ce sunt pe scurt teoria relativității restrânse (numită și specială) și teoria relativității generale (TRG)?

(R) TRR este teoria spațiului și timpului, care extinde mecanica newtoniană la cazul vitezelor foarte mari, iar TRG extinde TRR prin includerea conceptelor de „acelerație” și „gravitație” a oricăror sisteme de referință, nu doar în cele inerțiale.

- Mă aflu într-un vagon aflat în mișcare rectilinie uniformă și de la geam arunc, fără impuls, o bilă. Ce traiectorie va avea bila?

(R) Nu există traiectorii în sine, ci numai relativ la un s.r. Relativ la un s.r. legat de vagon, bila cade rectiliniu vertical și relativ la un s.r. legat de sol, traiectoria bilei va fi o parabolă.

- Comunicând cu o navă cosmică ce se apropie de Pământ cu viteza $\frac{1}{20}c$, cu ce viteză primim semnalele radio ale celor de pe navă și cu ce viteză le primesc ei pe ale noastre?

(R) Semnalele radio sau lumina se comportă la fel (conform principiului II al TRR) și ambii observatori, de pe navă și de pe Pământ, vor primi semnalele cu viteza c și nu $c \pm \frac{1}{20}c$.

- Cunoașteți două consecințe ale axiomelor TRR?

(R) Pe scurt, „timpul curge mai lent” și „obiectele se scurtează” în repere care se deplasează rapid. Mai precis:

- **Dilatarea timpului:** dacă un ceasornic se află în mișcare în raport cu un observator aflat într-un s.r. inerțial, acel observator va vedea ceasornicul său mergând mai lent decât un ceasornic aflat în repaus.

- **Contractia lungimilor:** În cadrul TRR, lungimea unei bare aflate în mișcare cu viteza v este egală cu L/γ , unde L a fost lungimea barei presupusă în repaus, iar $\gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}$; $\gamma > 1$.

- Care este valoarea lui γ pentru $v = 0,1c$?

(R) 1,005.

- Ați auzit de „paradoxul gemenilor”?

(R) Dacă unul din gemeni face o deplasare (ideală!) spre o stea îndepărtată, iar celălalt rămâne acasă, atunci după revedere, geamănul care s-a deplasat este mai tânăr decât cel rămas acasă.

De exemplu, un tânăr de 18 ani poate fi tatăl natural al unui tânăr de 20 de ani, dacă face o călătorie rapidă prin cosmos! Plecarea și întoarcerea necesită accelerații și TRR nu se aplică, dar să nu stricăm efectul paradoxului.

- Ar putea cineva să trăiască suficient pentru a ajunge la o stea aflată la 10 ani–lumină de Pământ?

(R) 1 an–lumină este distanța parcursă de lumină într-un an. Dacă viteza persoanei ar fi suficient de mare (un procent semnificativ al lui c), răspunsul este afirmativ.

- Cât de lungă este o rachetă de $L=20$ m (în repaus), care merge cu viteza $v=\frac{c}{2}$?

(R) Dacă $v=\frac{c}{2}$, atunci $\gamma \cong 1,155$ și lungimea cerută este $L/\gamma = \frac{20}{1,155} \cong 17,3$ m.

- Ce știți despre impulsul relativist al unui corp de masă m și viteză v ? Dar despre energia sa relativistă?

(R) Impulsul relativist este $p = \gamma \cdot m \cdot v$. Pentru $v=0$, avem $\gamma = 1$ și $p=m \cdot v$ (tocmai impulsul din mecanica newtoniană).

Energia cinetică relativistă este $E_c = mc^2 \cdot (\gamma - 1)$. Pentru viteze mici, $\gamma = 1 + \frac{v^2}{2c^2}$ și se regăsește formula uzuală $E_c = \frac{mv^2}{2}$.

- Care este legea a II–a a dinamicii Newton–Einstein?

(R) Cu notații standard, $F = \frac{dp}{dt} = \frac{d}{dt}(\gamma \cdot m \cdot v)$.

- Puteți justifica afirmația lui Einstein, că masa și energia unui corp sunt, esențialmente, echivalente?

(R) Lucrul unei forțe, care acționează asupra unui obiect aflat inițial în repaus, este tocmai energia cinetică relativistă a acelui obiect, anume: $E_c = \gamma \cdot m \cdot c^2 - mc^2 = (\gamma - 1) \cdot m \cdot c^2$.

Termenul $E_0 = m \cdot c^2$ este energia particulei în repaus, iar $\gamma \cdot m \cdot c^2$, energia totală.

Așadar, un obiect aflat în repaus are energia mc^2 stocată în masa sa; ca atare, masa poate fi convertită în energie și invers, fapt confirmat de reactoarele nucleare.

● Care este energia de repaus a unui glonț cu masa $m=10$ g?

(R) $E_0 = m \cdot c^2 = 10 \times 10^{-3} \times (3 \times 10^8)^2 \cong 9 \times 10^{14} \text{ J} \cong 2,5 \times 10^8 \text{ kWh.}$

Această energie nu este profitabilă; doar variația masei conduce la o variație profitabilă a energiei de repaus, conform formulei $\Delta E_0 = c^2 \cdot \Delta m$.

● Cunoașteți esența transformărilor Lorentz?

(R) Se numesc **mișcări** în spațiul fizic S acele aplicații $F: S \rightarrow S$ care sunt bijective (\equiv inversabile) și care conservă distanțele și unghiurile. Fizicianul olandez Lorentz a considerat spațiul $S = \mathbb{R}^4$ al evenimentelor punctuale spațio-temporale și a stabilit legătura dintre coordonatele relativ la două repere ($Oxyz$ și $O'x'y'z't'$) aflate în mișcare cu viteza v , astfel încât să se respecte axiomele I și II ale TRR.

Omitând (pentru simplificare) variabilele y și z , transformarea Lorentz este: $F: (x, t) \mapsto (x', t')$, definită prin formulele: $x' = \gamma(x - vt)$, $t' = \gamma\left(-\frac{v}{c^2}x + t\right)$, unde $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}$

● Ce cunoașteți despre simultaneitatea relativistă?

(R) Două evenimente spațio-temporale care au loc la același moment t într-un reper R , dar în puncte de abscise x_1, x_2 diferite, se vor produce la momentele $t'_1 = \gamma\left(-\frac{v}{c^2}x_1 + t\right)$ și $t'_2 = \gamma\left(-\frac{v}{c^2}x_2 + t\right)$, deci $t'_2 \neq t'_1$, într-un reper R' care se deplasează cu v față de R .

Așadar, acele evenimente nu vor mai fi simultane într-un reper inerțial care se deplasează cu viteza v în raport cu primul reper. Acesta este încă un argument esențial, care arată de ce timpul nu poate fi separat de spațiu. Deci, simultaneitatea este relativă. Dar, atenție, cauzalitatea nu este relativă (cauza nu poate precede efectul nici la Einstein!).

● Ce știți despre compunerea vitezelor în Fizica relativistă?

(R) Dacă avem două repere (\equiv s.r.) (R) și (R') în spațiu-timp, (R') deplasându-se cu viteza v în raport cu (R) și dacă notăm cu u viteza unui obiect relativ la (R) și cu u' viteza aceluiasi obiect măsurată în reperul (R') , atunci are loc relația $u' = \frac{u-v}{1-(u \cdot v/c^2)}$.

Dacă $u \ll c$ și $v \ll c$, atunci regăsim formula clasică newtoniană $u' \cong u - v$. Trebuie remarcat că dacă $u = c$, atunci $u' = c$.

COMPLETEARE:

Transformarea vitezelor pe axa x

$$\text{Știm că: } x = \frac{x' + ut'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}, \quad t = \frac{t' + \frac{ux'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

Deoarece (x') se mișcă față de (x) cu u , iar punctul A se mișcă cu v_x față de (x') și cu v_x față de (x) , atunci:

$$x' = v_x \cdot t' \text{ și rezultă că: } v_x = \frac{x}{t} = \frac{v_{x'} \cdot t' + ut'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \cdot \frac{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}{t' + \frac{ux'}{c^2}}$$

$$\text{adică } v_x = \frac{v_{x'} \cdot t' + ut'}{t' + \frac{ux'}{c^2}}, \text{ transformarea vitezelor pe } x \quad (1)$$

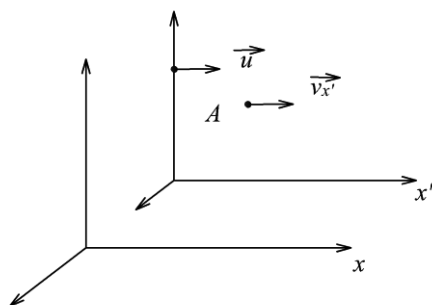


Fig. 6'.1

Transformarea vitezelor pe axa y

Să vedem acum cum apare v_y dacă punctul A se mișcă în (x') pe direcția y' și (x') se mișcă cu viteza u pe direcția x .

$$y' = v_{y'} \cdot t, \text{ dar } y = y', \text{ rezultă că } v_y = \frac{y}{t} = \frac{v_{y'} \cdot t'}{t},$$

$$\text{deci } v_y = v_{y'} \cdot \frac{t'}{t}.$$

$$\text{Însă } v_{x'} = 0 \text{ și atunci } t = \frac{t' + \frac{uv_{x'}t'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}, \text{ deci } t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}.$$

Rezultatul devine

$$v_y = v_{y'} \cdot \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}, \text{ transformarea pe } y. \quad (2)$$

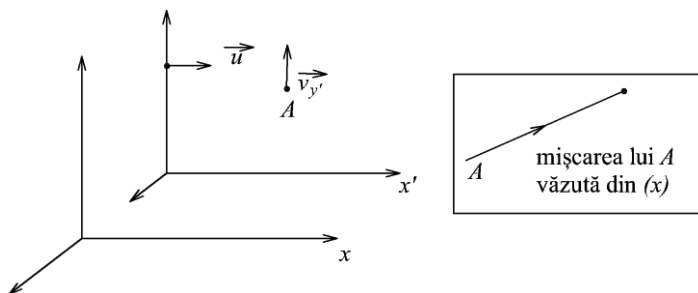


Fig. 6'.2

Care este masa corpului văzut în mișcare?

Fie un sistem (x') în care o particulă A se ciocnește elastic și perpendicular pe axa (Ox') , cu viteza w , de un perete.

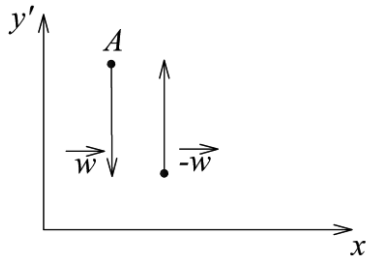


Fig. 6'.3

Variația impulsului este:

$$\Delta p = 2m'v. \quad (3)$$

De această dată nu mai presupunem că masa particulei este independentă de viteză, ci vrem să vedem dacă este independentă de viteză, de aceea am pus m' (mai bine ar fi fost m_w , poate depinde de $w \dots$). Acum, privim aceeași ciocnire dintr-un alt sistem de referință inerțial, (x) , față de care sistemul (x') se mișcă cu viteza \vec{u} .

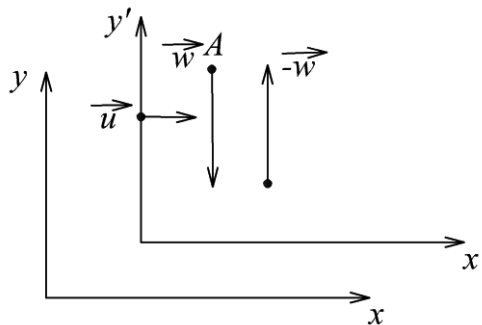


Fig. 6'.4

Variația impulsului în (x) este: $\Delta p = 2m'v$.

Viteza v nu este aceeași cu w ; după cum am văzut mai înainte există o relație, (2), clară în această situație, iar legătura

dintre ele, pe verticală, adică pe y este: $v=w\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}$

iar m'' este masa la viteza v , pe care am putea-o nota și cu m_v .

$$\text{Deci,} \quad \Delta p = 2m''w\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}. \quad (4)$$

Conform principiului relativității restrânse, legile fizice sunt aceleași, indiferent de sistemul de referință inerțial, deci impulsul trebuie să fie același, relația (3) = relația (4), rezultă:

$$m' = m_w = m'' \sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}} = m_w \sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}.$$

Dacă notăm $m_w = m_0$ = masa corpului în repaus (adică în sistemul care se mișcă) și $m = m_v$ = masa corpului în (x) , adică masa corpului văzut în mișcare, rezultă:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}. \quad (5)$$

Legătura dintre masă și energie

Din formula (5) de mai sus, putem deduce următoarele:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}, \text{ ridicăm la pătrat și scăpăm de numitor.}$$

$$m^2(1-\frac{u^2}{c^2}) = m_0^2, \quad m^2c^2 = m^2u^2 + m_0^2c^2$$

dar m_0 = constant, c = constant, rezultă că m_0c = constant, derivatele sunt egale, atunci derivăm față de timp pentru a vedea ce se întâmplă cu masa m și obținem:

$$c^2 \frac{d(m^2)}{dt} = \frac{d(m^2u^2)}{dt},$$

$$c^2 2m \frac{d(m)}{dt} = 2mu \frac{d(mu)}{dt}$$

$$\frac{d(mc^2)}{dt} = u \frac{d(mu)}{dt}$$

dar, știm din mecanică expresia forței ca variație a impulsului în timp, $F = \frac{d(mu)}{dt}$, deci, obținem $\frac{d(mc^2)}{dt} = F \cdot u$, însă tot din mecanică, avem variația energiei în timp, $F \cdot u = \frac{dE}{dt}$, așadar:

$$E = mc^2. \quad (6)$$

Aceasta este însă o simplă deducție matematică, un artificiu. De unde să-ți vină în cap să derivezi?

Einstein a făcut, în schimb, o observație fizică ce l-a dus pe acest drum, și anume: „fie moleculele dintr-un gaz, acestea se mișcă cu o viteză mult mai mică decât c , viteza luminii, iar când gazul este încălzit, viteza moleculelor crește, masa crește și gazul devine mai greu – temperatura, desigur, crește cu v^2 –”.

Creșterea masei – care am demonstrat că evoluează după legea formula (5) - se poate aproxima, deoarece $v \ll c$, prin seria

de puteri, serie binomială $m = m_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} = m_0 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8} \frac{v^4}{c^4} + \dots\right)$.

Seria converge rapid, așa încât neglijăm termenii după cel de-al doilea și avem $m = m_0 + m_0 \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}$, deci, $(m - m_0) = m_0 \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}$, dar $\frac{m_0 v^2}{2}$ este energia cinetică în sens newtonian, deci

$$\Delta m = (m - m_0) = \frac{\Delta E_{cin}}{c^2} \quad (7)$$

De aici încolo este inspirația și geniul lui Einstein.

Consecințele dependenței masei de viteză sunt foarte profunde

a) Ca formalism matematic (lucru de utilitate, nu de profunzime) putem găsi relații mult mai utile decât

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \text{ care, de fapt, nu se folosește prea des. În schimb:}$$

$$p = mv$$

$$E = mc^2$$

din care rezultă $m = \frac{E}{c^2}$, apoi $p = \frac{Ev}{c^2}$ și în cele din urmă

$$pc = \frac{Ev}{c} \quad (8)$$

iar din $p = mv$, $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$, rezultă $p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$ din care avem,

$$\frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \frac{Ev}{c^2} \text{ cu rezultatul } \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \frac{E}{c^2}.$$

Scăpăm de radical, aducem la același numitor și facem calcule simple, obținând:

$$E^2 \left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right) = m_0^2 c^4, \text{ apoi } E^2 - \frac{E^2 u^2}{c^2} = m_0^2 c^4 \text{ în care aplicând (8)}$$

obținem:

$$E^2 - p^2 c^2 = m_0^2 c^4 \quad (9)$$

b. Dacă avem o ciocnire neelastică (plastică) a două corpuri de aceeași masă, cu aceeași viteză în modul, însă de sens contrar, adică

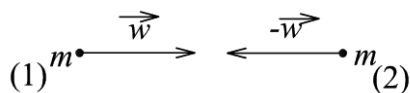


Fig. 6' .5

care formează corpul M (în repaus, bineînțeles) putem să vedem consecințele din punct de vedere relativist, dacă ne imaginăm că acest sistem se mișcă în sus, cu viteza infinitesimală u , față de un alt sistem (x) .

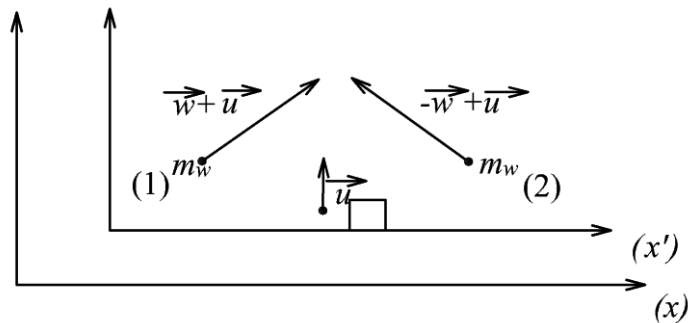


Fig. 6'.6

Fie m_w =masa corpurilor la viteza w și m_0 =masa corpurilor în repaus.

Deoarece u este o viteză foarte mică, $M_u = M_0$.

Așadar impulsul $p \rightarrow 2m_w u$ înainte de ciocnire trebuie să fie egal cu $p' = M_0 u$ după ciocnire.

Deci: $M_0 = 2m_w$.

Exact ca în mecanica newtoniană, numai că cele două corpuri contribuie cu masa lor de mișcare (care este mai mare decât masa lor de repaus).

Pentru ca impulsul să se conserve, atunci când două corpuri se alipesc, masa pe care o formează ele trebuie să fie mai mare decât masele de repaus ale corpurilor, chiar dacă ele sunt în repaus după ciocnire! (Feynman)

Aceasta înseamnă, printre altele, că din cauza energiei implicate în ciocnire, obiectul rezultat este unul diferit de cazul când le-am alipi încet. Când le alipim violent ele dau naștere la ceva a cărui masă este mai mare, nu la $2m_0$.

Așadar, dacă $M=2m_w$ și nu $2m_0$ înseamnă că masa în exces este egală cu energia cinetică adusă sistemului.

Adică energia are inerție! Formidabil!

Ca aplicație imediată, înseamnă că, dacă particula M se desface în două părți, fiecare cu masa m_w și acestea se opresc prin ciocnire cu altceva, ele vor ajunge la masa m_0 .

Cedarea de cantitate de masă ($M-2m_0$) înseamnă că energia eliberată, respectiv $(M-2m_0)c^2$ a rămas în substanța cu care respectivele părți s-au ciocnit, sub formă de căldură, energie potențială etc.

Așa au avut loc exploziile de la Hiroshima și Nagasaki; de aceea cantitatea imensă de energie transmisă substanței ce a oprit bombele (clădiri, oameni, Pământ) a distrus totul într-o asemenea măsură. De fapt, Einstein nu a avut nicio legătură cu “paternitatea” bombei atomice. Dar datorită lui s-a putut calcula, înainte ca explozia să aibă loc, ce energie urma să fie eliberată prin fuziunea uraniului (Feynman).

c. O altă consecință interesantă a creșterii masei cu ocazia creșterii vitezei de mișcare este următoarea:

În mecanica newtoniană, impulsul, care este $p=mv$, poate crește la nesfârșit, pe măsură ce v crește.

Ce se întâmplă în teoria relativității, unde v are o limită superioară: nu poate crește mai mult decât c ?

Dar, impulsul trebuie să fie același și în cazul limită al mecanicii clasice. Atunci, rămâne că impulsul, în teoria relativității restrânse, poate crește doar pe seama creșterii masei, căci $v=c$ este limitată.

Iată un frumos argument deductiv, după care m trebuie să crească cu viteza pentru ca impulsul p să aibă același comportament în cele două, diferite, exprimări de mai sus.

Este nefolositor și adesea imposibil să se separe energia totală a unui corp (mc^2) în energie de repaus, energie cinetică și energie potențială.

În loc de aceasta vom vorbi pur și simplu despre energia totală a particulei.

Vom “deplasa originea” energiei adăugând o constantă (m_0c^2) la orice energie și vom spune că energia totală este egală cu masa ori c^2 , iar când particula stă pe loc, energia este egală cu masa de repaus ori c^2 .

(De ținut minte această “deplasare a energiei” pentru cei care vor citi altundeva despre “invarianța de ecart”=gauge invariance, o teorie de mare succes folosită în mecanica cuantică și în fizica modernă!)

● Ce puteți spune despre „catastrofa ultravioletă”?

(R) Fizicianul austriac Wien a indicat o legătură între temperatură și lungimea de undă pentru care intensitatea radiativă a unui corp negru este maximă ($\lambda_{max} \cdot T = C_0$ constant), valabilă la frecvențe înalte.

Legea lui Rayleigh arată că dacă T crește, atunci scade lungimea de undă λ_{max} spre zona violetă și crește intensitatea radiației, în mod nelimitat.

Apărea o contradicție gravă și Planck a arătat că ambele legi aveau câte un domeniu limitat de valabilitate, stabilind o lege care să aproximeze legea Wien la frecvențe înalte și legea lui Rayleigh la frecvențe joase.

Totodată, el a explicat fenomenul radiației corpului negru pornind de la ipoteza, confirmată apoi experimental, că energia radiantă nu ia valori continue ci doar anumite valori discrete („pe sărite”), numite **cuante** de energie.

● Puteți enunța legea lui Planck a radiației?

(R) „Energia electromagnetică emisă sau absorbită la frecvența ν este $E=h\cdot\nu$, unde h este o constantă universală – numită constanta lui Planck”. ($h=6,625\times 10^{-34}$ J·s, având dimensiunea unei acțiuni).

Ulterior, s-a arătat că oscilatorii atomici ai corpului negru nu pot schimba cu mediul orice cantitate de energie, ci numai cuante de energie, de tipul $E_n=n\cdot h\cdot\nu$ cu $n\in\mathbb{N}$ și ν = frecvența oscilațiilor.

● În ce constă efectul fotoelectric?

(R) Hertz a observat că dacă pe o suprafață metalică ajunge un flux de radiație ultravioletă, atunci metalul emite un flux de electroni. O explicație a fost dată de Einstein, care a arătat că nu numai oscilatorii atomici ai corpului negru sunt cuantizați, dar lumina însăși conține cuante de energie, pe care le-a numit fotoni și cărora le-a atribuit un caracter dual corpuscular–ondulatoriu.

● Care este legea lui Einstein a radiației?

(R) Fasciculele de lumină se compun din cuante-fotoni; în cazul unei lumini monocromatice de frecvență ν , fiecare cuantă are energia $h\cdot\nu$.

Numărul de fotoni determină intensitatea luminii. Legea lui Einstein afirmă că „energia totală la frecvența ν este $n\cdot h\cdot\nu$, unde n este numărul de fotoni având această frecvență”.

● Puteți indica unele premise ale Mecanicii cuantice?

(R) Descoperirea structurii atomice, discrete, a materiei, apoi modelele succesive pentru atom (Dalton, Thomson, Rutherford, Bohr, de Broglie etc.), elaborarea tabelului periodic a peste 110 elemente chimice, descoperirea razelor catodice și a spectrelor atomice de absorbție și emisie, ca și dezintegrarea radioactivă.

● Care este scopul Mecanicii cuantice?

(R) Este studiul constituentelor elementare ale materiei, ca și al stabilității materiei, precum și cunoașterea diverselor procese fizice la scară atomică și subatomică.

● În ce constă efectul Compton?

(R) Are loc o creștere a lungimii de undă pentru o parte din radiațiile X incidente în cadrul împrăstierii electronilor slab legați, care își cedează o parte din energie.

● Demonstrați că efectul fotoelectric NU poate să apară cu un electron complet liber, adică un electron care nu este legat de atom.

(R) Avem fotonul, denumit γ , și electronul, denumit e . Scriem pentru aceste două particule conservarea impulsului și conservarea energiei:

$$p_{\gamma} + p_e = p'_{\gamma} + p'_e$$

$$E_{\gamma} + E_e = E'_{\gamma} + E'_e$$

Dar, la început electronul este considerat în repaus, deci p_e este zero, iar la sfârșit, fotonul a fost absorbit, deci p'_{γ} este zero și E'_{γ} este zero, deci relațiile devin:

$$p_{\gamma} = p'_e$$

$$E_{\gamma} + E_e = E'_e$$

Numai că, din relațiile de definiție ale impulsului și energie în mecanica cuantică avem:

$$E = h\nu$$

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h\nu}{c} \text{ pentru că } \nu = \frac{c}{\lambda} \text{ adică } p = \frac{E}{c}.$$

La început electronul era în repaus, deci energia lui în funcție de masa de repaus este $E_e = m_e c^2$, iar cu formula care leagă impulsul de energie, avem pentru foton $p_\gamma = \frac{E_\gamma}{c}$.

Relațiile inițiale devin atunci:

$$p'_e = \frac{E_\gamma}{c}$$

$$E_\gamma + m_e c^2 = E'_e.$$

Din aceste două relații, introducând impulsul din prima în a doua, obținem:

$$E'^2_e = p'^2_e c^2 + m_e^2 c^4 = \frac{E_\gamma^2}{c^2} \cdot c^2 + m_e^2 c^4. \quad (1)$$

Dar, pe de altă parte, dacă îl ridicăm la pătrat pe E'_e din expresia de mai sus, avem, pur și simplu:

$$E'^2_e = (E_\gamma + m_e c^2)^2 = E_\gamma^2 + 2 E_\gamma m_e c^2 + m_e^2 c^4. \quad (2)$$

Evident, că expresiile trebuie să fie egale, adică:

$$E_\gamma \cdot m_e = 0 \quad (3)$$

ceea ce înseamnă că:

$E_\gamma = 0$, adică nu există foton, ori

$m_e = 0$, adică masa de repaus a electronului este zero.

Amândouă posibilitățile sunt inacceptabile pentru teoria noastră, așadar, nu există efect fotoelectric dacă electronul nu se află legat de atom.

☉ Puteți enunța principiul lui Heisenberg al incertitudinii (≡ al indeterminismului)?

(R) Acest principiu arată limitele impuse de natura preciziei măsurărilor simultane ale poziției și impulsului particulelor (sau chiar obiectelor macroscopice). Enunțul tipic este următorul:

„Fie o particulă aflată pe o axă în poziția x , cu incertitudinea Δx a acestei poziții. Dacă impulsul acelei particule

are incertitudinea Δp_x , atunci are loc inegalitatea $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar$ (unde $\hbar = \frac{h}{2\pi} \cong 1,055 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)”.

COMPLETARE:

Asupra principiului lui Heisenberg

În 1927, fizicianul german W. Heisenberg a formulat principiul enunțat anterior, provocând multă nedumerire în lumea științifică. Legile lui Newton permit determinarea legii de mișcare a corpurilor, adică precizarea poziției acestora în timp.

Cunoscând legea de mișcare, se află viteza v și impulsul $p = m \cdot v$, fără nici un indeterminism. Așa era în Fizica premodernă, nu și în lumea particulelor atomice.

Să ne imaginăm că observăm mișcarea unui electron; ochiul nostru este grosier, iar capacitatea de discernere a unui microscop depinde de lungimea de undă a luminii cu care facem observarea. Pentru lumina vizibilă, aceasta este de circa 10^{-5} cm (1000 \AA); atomii au dimensiuni de circa 1 \AA , iar electronii, mult mai reduse și nu pot fi urmăriți.

Dacă folosim unde electromagnetice de tipul radiațiilor γ , cu lungimi de undă extrem de mici, cu atât mai mici vor fi obiectele care pot fi observate.

Pentru a obține o informație relativ la poziția electronului, de acesta trebuie să se reflecte o γ – cantă purtătoare a unei energii $h \cdot \nu$, dar cu cât este mai mică lungimea de undă, cu atât mai mare este frecvența radiației și ca atare energia cuantei și impulsul cuantei. Așadar, lovindu-se de electron, γ – cuanta îi transmite o parte din impulsul ei (impulsul unui foton este h/λ , unde λ este lungimea de undă).

Ca atare, măsurând poziția electronului, se introduce o nedeterminare în impulsul acelui electron. Inegalitatea lui Heisenberg precizează tocmai acest lucru.

Einstein a respins principiul lui Heisenberg; el a încercat să găsească un dispozitiv care să măsoare simultan cu precizie poziția și impulsul, dar nu a reușit. Pentru că nu se poate! Inegalitatea lui Heisenberg este o lege a naturii.

Se consideră că pragul care separă domeniul Macro și Microcosmosului este determinat de constanta lui Planck.

Exemplu: Să presupunem că folosim particule „macro” cu diametrul de 1 micron= 10^{-6} m și masa $m=10^{-13}$ kg. Din inegalitatea lui Heisenberg, rezultă $\Delta v_x \cdot \Delta x \geq \frac{\hbar}{m} \cong 10^{-21} \text{ m}^2/\text{s}$.

Dacă determinăm poziția unei particule cu precizia $\Delta x \cong 10^{-8}$ m (o sutime din mărimea ei), rezultă că $\Delta v_x \geq 10^{-13}$ m/s.

În practică, se obțin valori $v_x \cong 10^{-6}$ m/s și inegalitatea lui Heisenberg nu furnizează informații semnificative.

Dar în cazul unui electron cu $m=M_e \cong 9 \times 10^{-31}$ kg, rezultă $\Delta v_x \cdot \Delta x \geq 10^{-4}$ și informațiile furnizate pot fi utile.

COMPLETEARE:

Despre simetrii

Așa cum am menționat puțin mai înainte, o înțelegere importantă a noilor teorii fizice este că simetria joacă un rol fundamental în identificarea observabilelor care se conservă.

Câteva precizări, însă, asupra terminologiei.

În concepția mecanicii cuantice nu orice “cantitate fizică” poate fi măsurată oricând dorim și nici în orice condiții. Dintre toate, acelea pe care le putem “măsura” se numesc **observabile**.

Faptul că observabilele sunt înrudite cu simetriile este o idee foarte mult exploatată în studiul fizicii particulelor elementare.

Cea mai generală formulare a legii ce guvernează mișcarea sistemelor este “**principiul acțiunii minime**” care spune că: „fiecare sistem mecanic este caracterizat de o funcție $L(q, \dot{q}, t)$, numită lagrangianul sistemului și mișcarea se face astfel încât să se satisfacă o anumită condiție; această condiție fiind aceea că sistemul se mișcă între două poziții, q_1 și q_2 astfel încât integrala: $S = \int_{q_1}^{q_2} L(q, \dot{q}, t) dt$ să ia cea mai mică valoare”.

În cuvinte mai simple, această definiție înseamnă că dacă aruncăm o piatră, aceasta urmează întotdeauna traiectoria din figura 6'.7 (pe care o știm prea bine) și niciodată altă traiectorie, vezi figura 6'.8.

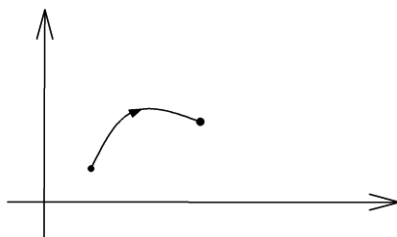


Fig. 6'.7

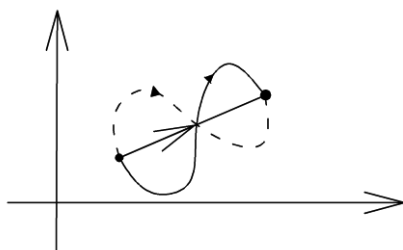


Fig. 6'.8

Pe de altă parte, minimumul acelei integrale, care reprezintă condiția ce trebuie îndeplinită ca mișcarea să aibă loc,

se obține rezolvând ecuația diferențială $\frac{\delta L}{\delta q} - \frac{d}{dt}(\frac{\delta L}{\delta \dot{q}}) = 0$, numită ecuația Euler-Lagrange. Nu dăm detalii.

Știm din experiență (și acest lucru trebuie bine subliniat, căci fizica este o știință a naturii, adică experiența este instanța ultimă care decide valabilitatea unui principiu, a unei legi) că dacă coordonatele și vitezele sunt precizate simultan, atunci starea sistemului este complet determinată și mișcarea ulterioară poate fi, în principiu, calculată (cu alte cuvinte, accelerațiile q'' la fiecare moment sunt unic definite).

Deci, este suficient să cunoaștem simultan coordonatele și vitezele pentru a cunoaște totul despre starea sistemului

Se spune că dacă o anumită coordonată (adică q sau q') nu apare explicit în funcția L , ea se numește **ciclică**, adică avem ecuația de mișcare pentru un punct material liber, ce nu se află sub influența altor sisteme sau corpuri/puncte materiale, de exemplu q' nu ar apare în această expresie.

Aceasta ar însemna că derivata vitezei (pe care în mecanica clasică, unde masa este constantă, o putem, într-un fel, asimila cu impulsul) nu apare în expresie, deci este, după definiția noastră, ciclică.

Cu alte cuvinte, impulsul este o mărime conjugată coordonatei q și, în acest caz, este o mărime ciclică.

Așadar, observația finală, fără mai multe detalii, este că “impulsul conjugat al unei coordonate ciclice este constant”.

Acum să ne întoarcem la prima idee de la subpunctul „simetrii” și anume, că **există o relație între simetriile din fizică și cantitățile ce se conservă** (pe acele cantități le-am numit observabile, adică se pot „măsura”).

Deoarece impulsul conjugat al unei coordonate ciclice se conservă (este constant în timp) - lucru ce nu va fi demonstrat aici-, înseamnă că sistemul nu depinde explicit de aceasta. Schimbându-l, nu obținem niciun alt efect asupra sistemului, sistemul rămâne același ca și mai înainte.

Așadar, dacă o coordonată este ciclică, sistemul este simetric la schimbările acestei coordonate. Mai mult, fiecare simetrie a acestei coordonate dă naștere la un moment conjugat ce se conservă.

Această idee valoroasă, după care observabilele ce se conservă sunt înrudite cu simetriile, ajută în mod excepțional dezvoltările din fizica particulelor (atom, nucleu).

De exemplu, poate ați auzit de o **lege a conservării parității** (cum ar fi că cineva rămâne dreptaci sau stângaci) în reacții ce implică particule elementare (există unele reacții în care această paritate nu se conservă!).

Dar iată ceva uimitor, care poate fi un exemplu foarte bun pentru înțelegerea valorii deosebite a acestui principiu ce leagă simetria de conservare:

S-a observat (în fizica particulelor elementare) că unele reacții nu apar niciodată și nu e niciun motiv evident pentru care de exemplu:

$$\bar{u}^- + p \rightarrow \bar{u}^0 + \Delta$$

să nu aibă loc! (\bar{u}^- , p , \bar{u}^0 , Δ sunt notații pentru anumite particule elementare, de exemplu p =proton).

După teoria cea nouă, reacția nu are loc, deoarece s-ar viola vreo lege de conservare. Dar care?

Nu e vorba nici de conservarea masei energiei, nici a sarcinii, nici a parității etc.

Și, constatând aceasta, ca și faptul că principiul de bază cu care lucrează fizica este că: “**ceea ce nu este interzis, este cerut**”¹ s-a ajuns la concluzia că trebuie să existe un principiu ce se încalcă de vreme ce reacția nu are loc.

Acest principiu a fost numit “**straneitate**” (strangeness) și s-a alocat fiecărei particule un “număr cuantic de straneitate”.

De exemplu, straneitatea particulei \bar{u} este 0, a protonului tot 0, iar a lui Δ este -1. Deci straneitatea din partea dreaptă a reacției noastre nu este egală cu cea din stânga.

Așadar, straneitatea, nu este conservată, în consecință reacția nu poate avea loc.

Poate vi se pare ciudată această abordare, dar, reflectați o clipă! Cu ce este mai “perceptibil” principiul conservării impulsului? Îl acceptăm mai ușor pentru că avem o formulă pentru impuls și fiindcă știm că o conservare a impulsului implică inexistența unei forțe rezultante nete ce acționează asupra sistemului.

În schimb, pentru straneitate nu avem nicio formulă și nici nu știm ce simetrie este implicată de către aceasta. Nu avem nicio idee nici care ar fi coordonata ciclică asociată. Totuși, ideea de bază este aceeași. În concluzie putem să formulăm în cuvinte simple, dar expresive, celebra teoremă a lui Emmy Noether:

“pentru fiecare simetrie există o constantă a mișcării corespunzătoare”, unde “constantă a mișcării” este o altă formulă a expresiei “mărime ce se conservă” (mărime ce rămâne la fel pe durata mișcării).

- ¹ Ce formidabilă este fizica! Gândiți-vă că în științele juridice se spune “ceea ce nu este interzis, este permis.” În fizică nu numai că este **permis**, ci este **cerut**.

CAPITOLUL 7': ELEMENTE DE FIZICĂ ATOMICĂ ȘI NUCLEARĂ

● Cu ce se ocupă Fizica atomică? Dar Fizica nucleară?

(R) Fizica atomică studiază structura atomică și proprietățile atomilor, ca și interacțiunile dintre atomii diferitelor substanțe și radiații. Fizica nucleară se ocupă de proprietățile și transformările nucleelor atomice și de efectele macroscopice ale interacțiunilor nucleare. Domeniile acestor științe sunt dificil de delimitat.

● Prin ce diferă atomii de elementele chimice?

(R) Se spune că există tot atâtea tipuri de atomi câte elemente chimice, dar este necesară o nuanțare.

Fiecare atom are un **număr atomic** Z , egal cu numărul electronilor constituenți și un **număr de masă** A , egal cu numărul neutronilor. Atomul are tot Z protoni (pentru a fi neutru electric). Izotopii unui atom au același Z cu atomul, dar diferă prin A . Un atom împreună cu izotopii lui formează un **element chimic**. De exemplu, toți atomii având $Z=92$ formează elementul uraniu U.

Notă: Elementele chimice se combină și generează **compuşii chimici**. Monoxidul de carbon CO, dioxidul de carbon CO₂, apa H₂O etc. sunt compuşi chimici.

Abia în 1774, francezul Lavoisier a descoperit oxigenul și a arătat că apa este un compus chimic. Dar tot el considera, în mod eronat, că „lumina” și misteriosul „fluid caloric” sunt elemente chimice!

Așadar, reținem că fiecare element chimic aparține unui atom și atomii unui element au același număr de protoni (sau electroni) cu elementul, dar diferă prin numărul de neutroni.

○ Ce determină ordinea elementelor din Tabelul periodic al lui Mendeleev?

(R) Numărul de protoni din nuclee, masele lor atomice și proprietățile chimice.

○ Care este sarcina electrică a unui atom? Dar a unei molecule sau compus chimic?

(R) Atomii sunt electric neutri deci sarcina lor electrică este nulă. Același lucru este valabil, de regulă, pentru molecule și compuși chimici.

○ Ce este procesul de ionizare a unui atom?

(R) Este procesul prin care atomul pierde sau câștigă electroni, devenind o particulă încărcată (ion pozitiv sau negativ).

○ Ce este electron-voltul?

(R) 1eV este energia pe care o obține o sarcină elementară (egală cu e) în prezența unei diferențe de potențial de 1V; așadar, $1\text{eV} \cong 1,6 \times 10^{-19}\text{J}$. Electron-volții sunt utilizați cu precădere pentru a exprima energiile particulelor atomice sau subatomice.

○ Presupunând cunoscute modelele lui Dalton, Thomson și Rutherford ale atomului, ce puteți spune despre modelul lui Bohr?

(R) Acest model a consacrat structura discretă a substanțelor și faptul că schimbul energetic dintre atom și o radiație se realizează prin cuante.

Energia și impulsul unui foton depind liniar de frecvența radiației: $E_f = h \cdot \nu$, $p_f = \frac{h \cdot \nu}{c}$. Bohr a formulat două postulate și o regulă de cuantificare, care permit, între altele, calculul mărimilor caracteristice ale unui electron – raza orbitei fundamentale, razele

celorlalte orbite, vitezele electronului pe diverse orbite, precum și perioadele mișcărilor electronilor pe orbitele staționare.

● Ce puteți spune despre numerele cuantice, introduse de Sommerfeld? Dar despre principiul lui Pauli?

(R) Acestea descriu energiile electronilor din atomi și valorile posibile ale momentelor cinetice orbitale și de spin, care permit deducerea configurațiilor electronilor în atomi.

Principiul lui Pauli este o lege de organizare a materiei profunde, deoarece el indică modul cum se creează configurațiile subatomice. Enunțul său este următorul:

„Electronii unui atom se comportă astfel încât într-o stare dată a atomului se află un singur electron; dacă doi electroni au aceleași prime 3 numere cuantice, atunci ei diferă prin spin”.

Pe scurt, în orice sistem nu pot exista simultan două particule distincte aflate în aceeași stare și din această cauză; principiul lui Pauli se mai numește „principiul de excluziune”.

● Ce cunoașteți despre modelul cuantic actual al atomului?

(R) Louis de Broglie a precizat modelul lui Bohr, arătând că electronii și alte particule subatomice se comportă atât ca niște corpusculi cât și ca unde, energiile lor variind odată cu lungimile de undă.

Dualitatea corpuscul–undă (valabilă în cazul naturii luminii sau al diverselor particule) înseamnă că diversele proprietăți pot fi descrise într-una sau alta dintre accepțiuni.

În locul orbitelor, se consideră **orbitale**, care sunt niște regiuni din jurul nucleului, având o configurație complexă, unde sunt situați cu probabilitate mare, electronii.

● Cum se pot distinge un foton și un electron având aceeași lungime de undă?

(R) Electronii sunt deviați de câmpuri electrice sau magnetice, nu și fotonii.

● Ce știți despre nucleul unui atom?

(R) Nucleul ocupă zona centrală a atomului și este încărcat cu întreaga sarcină electrică pozitivă a atomului, care contrabalansează sarcinile negative cumulate ale electronilor.

Forțele care țin electronii pe orbite în jurul nucleului în modelul Rutherford sunt cele electrostatice. Nucleul este alcătuit din protoni și neutroni.

Pentru un element chimic X, având numărul atomic Z și numărul de masă A , se scrie A_ZX și același simbol este utilizat și pentru nucleul atomului respectiv.

Sarcina electrică a nucleului este $Z \cdot e$. De exemplu, atomul de azot are simbolul ${}^{14}_7N$, iar nucleul de heliu, 4_2He .

● Recunoașteți elementele reprezentate simbolic prin ${}^{107}_{47}X$ sau ${}^{204}_{82}X$?

(R) Ag, Pb.

● Cunoașteți izotopii hidrogenului?

(R) Hidrogenul ușor este reprezentat prin 1_1H , deuteriul prin 2_1H și tritiul 3_1H . Izotopii unui element chimic diferă între ei prin numărul de neutroni.

● Ce sunt forțele nucleare tari?

(R) În nucleul unui atom, forța de respingere dintre doi protoni este de circa 10^8 ori mai mare decât forța de atracție dintre electroni și nucleu.

Forțele nucleare nu sunt de natură electrostatică, ele fiind forțe neutron–neutron sau neutron–proton; interacțiunile dintre nucleoni (adică neutronii și protonii la un loc) se numesc **interacțiuni tari**. Acestea au rază mică de acțiune și nu sunt forțe centrale.

Nucleonii reacționează doar cu vecinii mai apropiați. Așadar, forțele nucleare tari țin nucleonii împreună în nucleu.

● Ce s-ar întâmpla dacă în nucleu ar exista doar electroni și neutroni?

(R) Acel nucleu ar exploda.

● În ce caz atomii pot pierde electroni?

(R) Dacă li se furnizează energie sau dacă sunt bombardați cu alți atomi sau particule.

● Ce sunt particulele α ? Cum se modifică masa unui nucleu după o dezintegrare cu o particulă α ?

(R) Nuclee ale atomului de He. Masa descrește cu 4 amu ($1 \text{ amu} \equiv 1 \text{ u} \equiv 1,661 \times 10^{-27} \text{ kg}$).

● Ce se întâmplă cu sarcina unui nucleu după o dezintegrare cu o particulă β^+ ?

(R) Descrește cu 1.

● Ce se întâmplă cu izotopul ${}^{236}_{92}\text{U}$ după o dezintegrare cu o particulă α ?

(R) Devine ${}^{232}_{90}\text{Th}$.

● În ce se transformă izotopul ${}^{19}_8\text{O}$ după o dezintegrare cu o particulă β^- ?

(R) Devine ${}^{19}_9\text{F}$.

☉ Ce este radioactivitatea naturală? Dar cea artificială?

(R) Nucleele stabile își mențin în timp structura. Legat de nucleele grele, Becquerel a descoperit că are loc emisia spontană de radiații și particule provenite din nucleu, cu formare de nuclee noi. Acest fenomen s-a numit **radioactivitate naturală**.

Ulterior, s-au realizat radiații rezultate din dezintegrarea nucleelor grele după ciocnirea nucleelor cu particule nucleare accelerate; acest fenomen și altele similare s-au numit **radioactivitate artificială**.

☉ Ce spune legea dezintegrării radioactive?

(R) Dacă $N(t)$ este numărul nucleelor radioactive existente la momentul t ($t \geq 0$), există o constantă $\lambda > 0$ astfel încât $N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda t}$, pentru orice $t \geq 0$.

Notând cu T perioada de înjumătățire a lui $N(t)$, adică $N(t+T) = \frac{1}{2} N(t)$ pentru orice $t \geq 0$, atunci $T = \frac{\ln 2}{\lambda}$. „Jumătatea pierdută” se transformă în radiație.

☉ Ce tipuri de interacțiuni ale radiației nucleare cunoașteți?

(R) Radiațiile sunt invizibile, dar au efecte dintre cele mai diverse. De exemplu, nu vedem fotonii, dar le resimțim interacțiunea cu reținele noastre.

Se studiază separat interacțiunile electronilor cu diverse alte nuclee sau interacțiuni ale neutronilor cu alți atomi, precum și ale razelor γ cu diverse substanțe.

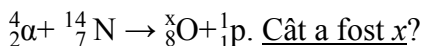
☉ Ce sunt reacțiile nucleare?

(R) Sunt fenomene prin care se modifică spontan structura unor nuclee atomice sau care conduc la interacțiuni cu alte nuclee sau cu alte particule. Prin reacții nucleare au loc transformări de nuclee prin radioactivitate artificială.

● Cum se desfășoară reacția în lanț de dezintegrare a nucleelor de uraniu?

(R) Răspunsul uzual este acela că un neutron lovește un nucleu și îl descompune, generând alți neutroni. Fiecare din ei face același lucru și în acest mod apar alți neutroni etc. Dar de unde apare primul neutron?

● Reacția prin care Rutherford a produs oxigen din bombardarea nucleului de azot cu particule α a fost:



(R) 17.

● Un nucleu ${}^{238}_{92}\text{U}$ capturează un neutron și formează un nucleu instabil care trece prin două dezintegrări succesive cu β^- . Care este nucleul rezultat?

(R) ${}^{239}_{94}\text{Pu}$.

● De ce fisiunea lui ${}^{235}_{92}\text{U}$ produce o reacție în lanț?

(R) Deoarece eliberează în medie mai mult de un neutron.

● O radiație conținând electroni, protoni și neutroni se izbește de un perete de beton. Presupunând că toate particulele au aceeași energie cinetică, indicați care din particule va penetra cel mai mult peretele?

(R) Neutronii, deoarece fiind electric neutri, ei nu pierd energie pentru ionizare.

● Care este deosebirea dintre fisiunea nucleară și fuziunea nucleară?

(R) În cadrul **fisiunii**, neutronii, particulele α , protonii sau fotonii γ divid nucleeele atomice în mai multe fragmente cu mase comparabile între ele.

Reactoarele nucleare existente realizează fisiunea nucleară a izotopilor unor elemente chimice radioactive grele, cu utilizarea energiei obținute (în scopuri pașnice sau militare).

Fuziunea nucleară este reacția nucleară de obținere a unui nucleu greu din contopirea a două nuclee ușoare, cu eliberarea unor energii imense.

Fuziunea nucleară are loc la temperaturi de milioane de K și reprezintă o speranță pentru rezolvarea problemelor energetice pe Pământ, deocamdată fără acoperire concretă.

● În reacția de dezintegrare a nucleului de uraniu, se degajă o energie imensă. Cum se explică acest fapt?

(R) Un răspuns tipic este următorul: fiecare nucleon are o energie de legătură de circa 7 MeV deci în nucleul U_{235} ar exista energia $7 \times 235 = 1645$ MeV, care s-ar elibera prin dezintegrarea nucleului. De fapt, cei 1645 MeV reprezintă energia necesară pentru a desface nucleul de uraniu în nucleonii componenți și nu o energie care se eliberează!

Răspunsul corect este acela că energia de legătură a particulelor rezultate din „schije” rezultate la dezintegrarea nucleului de uraniu este mai mare decât suma energiilor de legătură ale particulelor rezultate și tocmai diferența respectivă este eliberată.

● Ce particule erau considerate în 1932 ca „particule elementare”?

(R) Electronul, protonul, neutronul și fotonul. Actualmente, se cunosc peste 60 de particule elementare, caracterizate prin masă, sarcină electrică și spin.

● Care este antiparticula unui electron? Dar a unui foton?

(R) Pozitronul; este tot fotonul.

- Dacă ignorăm semnele, care proprietate a particulelor și antiparticulelor corespunzătoare nu au aceeași mărime?

(R) Niciuna.

- Cum s-ar putea explica raza nedefinită de acțiune a câmpului electromagnetic?

(R) Schimbul de fotoni cu energii infime există timp îndelungat și fotonii pot parcurge distanțe nelimitate.

- Ați auzit de stele neutronice?

(R) O stea neutronică se poate forma dintr-o stea uzuală printr-o comprimare rapidă. Într-o stea obișnuită precum Soarele nostru, există un echilibru între forțele de gravitație care tind să comprime steaua și forțele de presiune a substanței stelare care se opun comprimării.

Comprimarea începe atunci când în interiorul stelei sursele termonucleare de energie se epuizează, când densitatea crește enorm, electronii atomilor se concentrează în nucleu și se declanșează reacții nucleare de transformare a protonilor în neutroni. O stea precum Soarele ajunge să fie formată doar din neutroni, contractându-se la o sferă cu diametrul de cel mult 20 km. Existența stelelor neutronice a fost prezisă de către fizicianul rus Landau.

COMPLETARE:

Cele 4 tipuri de forțe fundamentale din natură

Acestea sunt: forțele electromagnetice, cele gravitaționale (acestora două li se aplică legile lui Maxwell și Newton), interacțiunile nucleare tari și cele slabe.

Și acum să le luăm pe rând.

Ca percepție generală, **forțele** sunt împingeri/trageri și au caracter vectorial. Forțele gravitaționale explică orbitele cvasicirculare ale planetelor, iar cele electrice/electrostatice mențin electronii pe orbitele atomice.

De forțele gravitaționale se leagă conceptul de **masă** și de cele electrice, conceptul de **sarcină**. Sarcinile electrice în mișcare generează forțe magnetice, la nivel macroscopic.

Mai departe, este necesar să abordăm lumea atomică. Forțele electrice atractive dintre electroni și nucleul atomic sunt cele care mențin structura atomului.

Constituenții nucleelor atomice au fost identificați abia după anul 1930; ei se numesc nucleoni și cuprind neutronii și protonii.

Raza unui atom este de circa 10^{-10} m, iar cea a nucleului său este de 10^{-14} m și s-a pus întrebarea: cum poate nucleul să conțină atâția protoni, la distanțe mutuale mici, dacă ei se resping electric?

Răspunsul este dat de existența unor **forțe nucleare tari**, neelectrice și necentrale. Atomii sunt neutri electric și se asociază în diverse moduri pentru a forma molecule și apoi compuși macroscopici, până la toate obiectele din jur, care au o structură stabilă și nu curentează.

Forțele de frecare dintre solide, forțele de vâscozitate dintre straturile de lichid, ca și forțele elastice, studiate în Mecanică, sunt aspecte particulare ale celor trei forțe fundamentale menționate.

Cea de a 4-a forță fundamentală o constituie **interacțiunile nucleare slabe**, apărute în cadrul radioactivității, care transformă nucleele în alte specii nucleare.

În ordinea descrescătoare a mărimilor lor, cele mai puternice sunt interacțiunile tari, urmate de forțele electromagnetice, interacțiunile slabe și forțele gravitaționale.

Interacțiunile nucleare tari și slabe acționează doar la distanțe subatomice, unde se aplică Mecanica relativistă.

Deosebirea dintre forțele nucleare și cele electromagnetice este că primele au rază mică de acțiune și sunt foarte puternice, ceea nu este cazul cu celelalte.

Cele 4 tipuri de forțe fundamentale sunt transmise prin diverse particule speciale. Astfel, forțele electromagnetice sunt transmise prin **fotoni**, forțele nucleare tari – prin **gluoni** și cele nucleare slabe – prin **bosoni**.

Se presupune că și gravitația s-ar transmite prin niște particule, deocamdată ipotetice – gravitoni. Aceste particule încarcă spațiul cu diverse **câmpuri** – câmpul electromagnetic, câmpul Yang–Mills și câmpul gravitațional.

Mai precis, forțele nucleare tari au intensitatea 1 (ca reper) și raza de acțiune de 10^{-15}m , forțele nucleare slabe au intensitatea 10^{-6} și raza de acțiune 10^{-18}m .

Forțele electromagnetice au intensitatea 10^{-2} , iar gravitația are intensitatea 6×10^{-39} , ambele având raza de acțiune nedefinit de mare.

„Visul lui Einstein” a fost acela de a crea o teorie care să unifice toate tipurile de forțe; până acum el s-a realizat parțial, teoria respectivă neincluzând gravitația.

COMPLETARE:

Despre particulă

În mecanica clasică se poate introduce conceptul de corp rigid (solidul), adică un corp care nu este deformabil în nicio condiție. În teoria relativității am vrea să considerăm, în mod similar, drept rigide acele corpuri ale căror dimensiuni rămân neschimbate în sistemul de referință față de care acestea se află în repaus. Totuși, se poate arăta că teoria relativității face existența corpurilor rigide **imposibilă**.

Imposibilitatea existenței rigidului solid se poate demonstra, de exemplu, astfel:

Presupunem că un corp solid este pus în mișcare de către o forță externă ce acționează asupra unuia dintre punctele sale.

Dacă solidul ar fi rigid, atunci toate punctele sale ar trebui puse în mișcare în același timp cu punctul asupra căruia s-a acționat cu forța; dacă nu ar fi așa înseamnă că ar trebui să se deformeze corpul. Totuși, teoria relativității face acest lucru imposibil, deoarece forța aplicată într-un punct anume se transmite celorlalte puncte cu o viteză finită, așadar **punctele nu se pot mișca simultan**.

Din această discuție, se poate trage o anumită concluzie în ceea ce privește „particula elementară”, adică particulele ale căror stări presupunem că sunt descrise complet dacă dăm cele trei coordonate și cele trei componente ale vitezei.

Este evident că, dacă particula are dimensiuni finite, adică are o anumită întindere în spațiu, nu poate fi deformabilă, deoarece conceptul de deformabilitate este legat de posibilitatea unei mișcări independente a părților individuale ale corpului.

Dar, așa cum am văzut, teoria relativității ne arată că este imposibil să existe corpuri rigide.

Astfel, ajungem la concluzia că în mecanica relativistă clasică (necuantică), nu putem să atribuim dimensiuni finite particulelor, pe care le privim drept elementare. Cu alte cuvinte, în cadrul teoriei clasice, **particulele** trebuie tratate drept **puncte**.

Dualitatea undă- particulă

Poate ne amintim povestea cu hainele împăratului și cum a fost sedus acestea de argumentele sfetnicilor spre a ieși în pielea goală pe-afară, crezând că poartă cele mai frumoase veștminte. Ceva similar s-a întâmplat atunci când oamenii de știință au început să ne explice cum moleculele (poate inexistente, oricum invizibile) erau răspunzătoare pentru presiunea ce ține roțile mașinii umflate, transpirația pielii, dansul fumului de țigară etc.

Dar, ulterior, ni s-a spus că acestea, moleculele, sunt compuse din părți și mai mici, atomii, care sunt răspunzători pentru tot ceea ce se întâmplă în jurul nostru: culoarea obiectelor, strălucirea metalelor, tendința de a fi solid, lichid sau gaz, duritatea și “veșnicia” diamantelor.

● Cum ar putea aceste mici particule, atomii, să conducă la marea diversitate a naturii?

(R) Poate prin forma, dimensiunea lor, ori poate prin capacitatea lor de a sta împreună.

De aceea, la un moment dat, oamenii au început să se uite cu atenție la aceste “cărămizi” constitutive ale materiei.

Pentru aceasta, sigur că oamenii de știință au trebuit să inventeze dispozitive prin care să putem vedea cu ochii, nu numai cu “ochii minții”, aceste particule.

Atomii nu s-au putut vedea cu microscopul obișnuit pentru că, atomii și chiar moleculele mai mici, sunt sub lungimea de undă a oricărei lumini monocromatice vizibile.

Și știm acum că, după ipoteza lui de Broglie, fiecărei particule îi asociem o lungime de undă după formula:

$$\lambda = \frac{h}{\text{masa} \cdot \text{viteza}} .$$

Ce înseamnă aceasta?

Să zicem că Simona servește o minge de meci (de masă 200 grame) Serenei, cu 120 km/h (33m/s).

Știm cât este $h=6,6 \times 10^{-34}$ Js = constanta lui Planck, o mărime universală. Atunci, lungimea de undă prezisă pentru mingea de tenis este de circa 10^{-34} m. Ceva indiscernabil pentru dimensiunile lumii pe care o cunoaștem prin simțuri!

Iar lungimea de undă a luminii roșii este aproximativ $0,75 \times 10^{-9}$ m, așadar și aceasta este mult prea mică pentru a ne aștepta să vedem proprietățile ondulatorii ale obiectelor din lumea noastră de zi cu zi.

Am putea încerca cu raze X, care au lungimea de undă de circa 10^{-10} m?

Nu prea. Nu există materiale potrivite pentru a face lentile pentru raze X, căci niciun material nu poate să “îndoaie”, să focalizeze razele X, așa cum face sticla cu lumina vizibilă.

O idee care ar împinge lucrurile înainte ar fi să folosim un câmp magnetic pentru a “îndoi” razele X, căci știm că un câmp magnetic afectează mișcarea electronului în acest fel; vezi formula forței lui Lorentz $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$, în care forța magnetică acționează ca o forță centripetă și creează o traiectorie circulară pentru electronul ce intră într-un câmp magnetic \vec{B} .

Atunci, poate în loc de raze X să folosim chiar electronii știind că distanța dintre atomii din cristal este de ordinul 10^{-9}m .

Aceasta a fost, într-adevăr, o idee bună și pe baza ei s-a construit microscopul electronic, folosindu-se rețelele de difracție suficient de înguste ca să se obțină figurile de difracție așteptate, ca urmare a interferenței și difracției similare cu cea a luminii din explicațiile precedente.

Lucrurile nu au fost însă așa de ușoare cum par. Unii oameni de știință au încercat să explice aceste rezultate, figurile de interferență, sugerând că electronii lovesc marginile fantei de difracție și că aceasta creează radiația așadar figurile de difracție și interferență sunt cele ale radiației, nu ale electronilor.

Pentru a testa această ipoteză, s-a încercat deflectionarea (modificarea traseului inițial) fasciculului de electroni cu ajutorul forțelor electromagnetice, plasându-se, de exemplu, o baghetă încărcată sau un magnet în vecinătatea drumului fasciculului de electroni. Fasciculul de electroni este deflectat de astfel de forțe, dar radiația nu.

Când s-a realizat experimentul, figurile de difracție și de interferență s-au deplasat în felul așteptat pentru electroni. Electronii formează așadar figurile de difracție și de interferență.

● Ce ar fi de reținut ca foarte important din modul în care s-a ajuns la cercetarea științifică bazată pe considerarea naturii ondulatorii a electronului?

(R) În primul rând că cele mai mici obiecte pe care le putem discerne, cu orice microscop, sunt limitate de lungimea de undă folosită pentru observare. Aceasta se întâmplă deoarece unde se difractă când întâlnesc obiecte de mărime comparabilă cu lungimea lor de undă.

Apoi, trebuie subliniat că experimentul cu două fante este un experiment real, el a fost realizat cu adevărat. Așadar, orice “model al materiei” am avea în cap, acesta trebuie să corespundă rezultatelor experimentale prezentate.

Deoarece acesta este un experiment crucial pentru dezvoltarea întregii științe, vom mai zăbovi o clipă pentru ca lucrurile să fie limpezi ca lumina zilei.

Să ne imaginăm prima dată trecerea unui fascicul de electroni printr-o singură fantă. Ajungând la ecran, electronii sunt înregistrați pe film. Așa vedem că rezultă o imagine mult mai lată, mai mare, decât mărimea fantei prin care a trecut fasciculul.

Dacă repetăm experimentul folosind fante de diferite mărimi, observăm că îngustarea fantei duce la lățirea imaginii pe film, în timp ce, lățirea fantei conduce la îngustarea suprafeței înregistrate pe film.

Exact așa ceva așteptăm în cazul difracției unei unde.

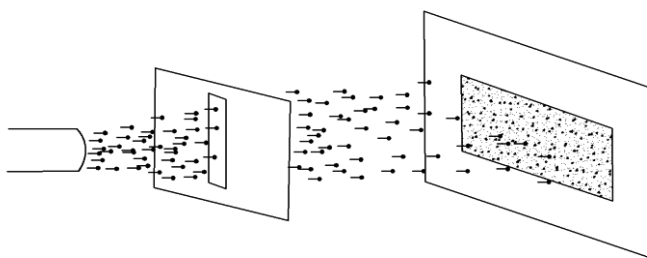


Fig. 7'.1

Dacă avem în minte legătura găsită de de Broglie între lungimea de undă asociată particulei, $\lambda = \frac{h}{\text{masa} \cdot \text{viteza}}$, în cazul nostru electronul din experiment și viteza acestuia, anume că sunt invers proporționale, putem face un alt experiment în care trimitem electronii mai rapizi către ecran (adică, echivalentul

lungimii de undă mai mici) și obținem imagini mai înguste pe film, așa cum ne-am fi așteptat să fie prezise de ecuația amintită. Apoi, electronii ce trec prin fiecare fantă vor forma o figură de difracție largă și cele două figuri de difracție ar acoperi, de fapt, aceeași suprafață pe imaginea înregistrată.

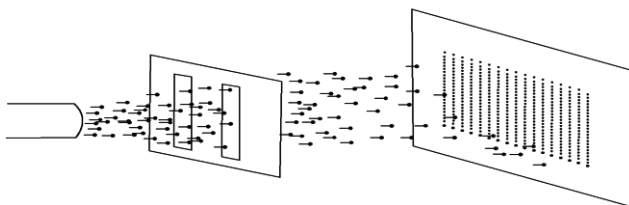


Fig. 7'.2

Vom obține pe film o imagine ce alternează linii albe și negre. Pe anumite zone din film electronii vin de la ambele fante, în timp ce, cu ambele fante deschise (!), nu ajunge niciun electron.

Cum se poate să se anuleze unul pe altul?

Singurul fenomen pe care îl știm, în care o astfel de „anulare” există, este interferența undelor.

Nu avem altă alternativă, decât aceea de a concluziona că electronii au proprietăți de undă!

S-au făcut experimente cu protoni, neutroni, chiar cu nuclee de atomi în loc de electroni: materia arată fenomene ce sunt în mod obișnuit asociate doar cu undele.

● Ce se întâmplă însă cu ideea că electronul este o particulă?

Dispare acest concept?

(R) Nicidecum.

Tot experimental vedem că, dacă reducem numărul de electroni din fascicul, astfel încât numai un singur electron să călătorească prin aparat la un moment de timp, electronul ajunge

întreg, nedivizat, ca un singur spot-punct pe ecran. Nu face nicio figură de interferență, difracție sau altceva.

Totuși, deîndată ce sunt mai mulți electroni care traversează drumul în același timp, se formează din nou figura de interferență despre care am vorbit. De remarcat că singurul lucru care oprește sosirea într-o anumită locație este prezența celor două fante deschise.

Dacă este deschisă o singură fantă, electronul este liber să ajungă în orice loc pe ecran/film (în cazul unei figuri de difracție foarte largi).

Deoarece, fiecare electron individual „evită” aceste poziții numai când ambele fante sunt deschise, trebuie să concluzionăm că fiecare electron este afectat de ambele fante.

Fiecare electron „detectează” cumva prezența celor două fante. Fiecare electron trebuie să treacă prin ambele fante, într-o oarecare fel (important).

Aceste dificultăți conceptuale pot fi rezolvate numai considerând că electronii (particulele, în general) călătoresc precum undele.

Electronii sunt întotdeauna detectați ca particule, dar intensitatea unde într-un loc anume guvernează șansa ca un electron să fie detectat acolo.

Niciun electron nu poate fi găsit acolo unde unda asociată lui este zero, ci numai în locurile în care unda este „puternică” (intensitatea ei).

În consecință, este clar că trebuie să se modifice legile de mișcare în mod semnificativ, ca să se țină seama de rezultatele experimentale (acest nou formalism ce descrie mișcarea a fost

denumit la început ”mecanica ondulatorie” tocmai din acest motiv, apoi ”mecanică cuantică” sau ”fizică cuantică”).

Când aceste noi legi de mișcare se aplică obiectelor „mari” (în comparație cu atomii), se găsește că undele prezise devin „localizate”, adică își păstrează „integritatea”, „localizarea”, pe măsură ce se mișcă.

Teoria prezice existența unor pulsuri de undă ascuțite care se mișcă din loc în loc. Când acestea sunt interpretate ca fiind „particule”, se găsește că acestea se mișcă într-un mod ce corespunde legilor lui Newton.

De fiecare dată, însă, când „undele de materie” se mișcă în acest fel, fenomenele de interferență și difracție nu sunt importante (de exemplu, eu nu sufăr difracție când trec prin ușa întredeschisă!).

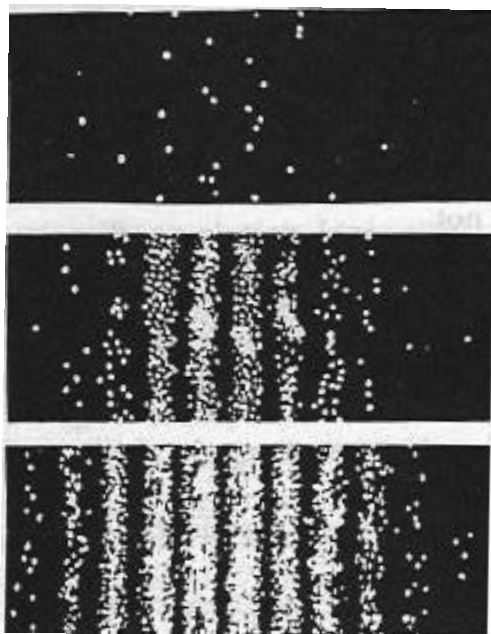


Fig. 7'.3

Principiul de incertitudine

Natura ondulatorie a materiei naște întrebări interesante.

- De exemplu, cu ce precizie este posibil să se determine poziția unei particule?

(R) Să ne amintim ce am spus mai înainte: probabilitatea de a localiza/de a găsi o particulă în “unda de materie” (adică în unda asociată respectivei particule) este mare acolo unde intensitatea undei este mare și mică unde intensitatea este slabă.

Pentru simplitate să ne imaginăm o astfel de undă (vezi figura 7'.4) care este destul de puternică într-o regiune din spațiu și zero în afara acestei regiuni (o astfel de undă formează un “pachet de unde”).

Particula trebuie să se afle (să fie localizată) undeva înăuntrul acestei regiuni, dar nu știm exact unde anume. Localizarea ei este incertă, într-un grad de nedeterminare egal cu mărimea regiunii în care unda are intensitatea puternică.

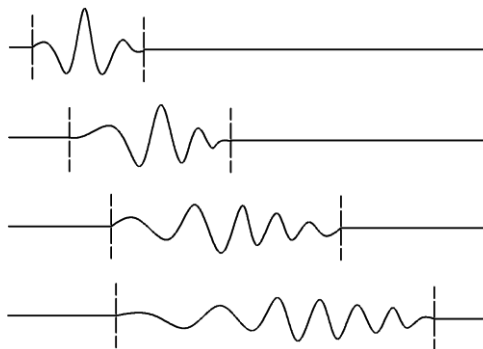


Fig. 7'.4

Dacă această regiune este largă, poziția particulei este incertă; dacă regiunea este mai îngustă, poziția particulei este mai puțin nesigură, mai certă.

Așadar, poziția particulei este mai bine precizată în unde mai înguste, decât în cele largi.

Deci oricât de îngust am face pachetul de unde, nu putem găsi poziția particulei cu mai multă precizie, decât lățimea pachetului însuși. Așadar, aceasta nu este o limitare a aparaturii pe care o folosim, ci o limitare „dictată” de natura însăși.

● Dar s-ar putea forma un pachet de unde ce să fie foarte mic?
Poate, dacă lățimea pachetului ar tinde la zero, atunci, am găsi cu precizie absolută unde se află particula?

(R) Nu. Acest lucru este imposibil, deoarece un pachet de unde nu poate fi mai îngust decât lungimea de undă a unde.

Este evident că dacă nu avem cel puțin o lungime de undă, nu știm care este unda (căci nu știm unde începe și unde se termină elementul care o definește, lungimea de undă); nu o putem, așadar, nici măcar defini.

Această observație are consecințe interesante.

Să zicem că evaluăm tot timpul particule care au aceeași masă (spre simplitatea discuției).

Atunci, conform formulei evocate (de Broglie, $\lambda = \frac{h}{\text{masa} \cdot \text{viteza}}$), lungimea de undă este invers proporțională cu viteza particulei.

Așadar, dacă avem, o lungime de undă mică, adică identificăm cât putem de bine particula, viteza ei va fi uriașă.

Această relație dintre viteză și precizia de localizare are și alte consecințe importante.

Să ne imaginăm că “răcim” particula până aproape de 0K. Interpretarea noastră este că temperatura mare înseamnă o energie internă mare a particulei (echivalentul unei energii cinetice proporționale cu pătratul vitezei).

Așadar, dacă răcim particula, adică îi micșorăm energia cinetică, ne putem imagina că viteza ar fi zero pentru temperatura de zero Kelvin (zero absolut). Atunci, conform relației de mai sus, înseamnă că nu am putea localiza particula nicăieri. Ea ar putea să se afle oriunde în Univers!

Această dilemă este rezolvată de natură, care cere ca fiecare material să-și păstreze o parte din energia cinetică internă chiar și la zero absolut. Particulele totuși se mișcă, având o lungime de undă suficient de scurtă, corespunzătoare gradului de localizare care a fost observat.

Energia care rămâne atunci când temperatura este zero se numește energia punctului zero și reprezintă cea mai mică energie, fără însă a fi zero.

Deci, dacă cerem pachetului de unde să aibă o lungime de undă cât mai mică, pentru a putea localiza cât mai bine particula, vom avea o viteză ce poate fi găsită într-un domeniu larg de valori. Și atunci are un grad mare de nedeterminare.

Aceste două lucruri asamblate conform discuțiilor de mai sus, se formalizează într-un principiu, numit principiul de incertitudine care spune că:

*masa*nedeterminarea în viteză*nedeterminarea în poziție ≥ ħ*
dar,

$$masa*viteza=impulsul,$$

așadar

*nedeterminarea în impuls*nedeterminarea în poziție ≥ ħ.*

Apariția constantei lui Planck ($=6,626 \cdot 10^{-34}$ Js) în ecuație ne explică de ce, în mod normal, nu putem observa aceste valori.

Măsurările noastre de zi cu zi, aceasta înseamnă și observațiile noastre (căci măsurarea înseamnă observație de un

anumit fel, și reciproc) nu ajung la această acuratețe extraordinară cerută de dimensiunea constantei lui Planck (10^{-34} m!!!). Dar când ne referim la lumea atomică, unde nucleul are dimensiuni proporționale cu 10^{-15} m, această precizie începe să conteze.

Spectrometrul de masă

- Ar mai putea exista oare o altă metodă prin care structura atomului să se dezvăluie?

(R) Una din cele mai fructuoase metode a apărut ca urmare a eforturilor de a măsura masa individuală a atomului. Reușita oamenilor de știință în această privință a deschis calea către o extraordinară bogăție de informații, iar una din cele mai simple metode s-a bazat pe instrumentul numit **spectrometru de masă**.

Acestă metodă se bazează pe relația teoretică ce ne spune că: $m=2 \times \frac{E_{cin}}{v^2}$, care este forma rearanjată a ecuației energiei cinetice.

Așadar, spectrometrul de masă funcționează dând electronului o anumită energie cinetică și apoi observând cât de repede călătorește acesta.

- De ce este interesant de povestit despre acest instrument?

(R) Pentru că, în acest fel, vedem cum tehnica face ca știința să fie atât de puternică, căci a scrie ecuațiile nu este de ajuns.

Trebuie să ne imaginăm (tehnic) cum să dăm electronului energie cinetică și cum să măsurăm cu precizie viteza rezultată, de exemplu, lucruri care nu sunt deloc ușor de realizat.

Ne gândim să folosim atracția electrică pentru a da energie unui atom, dacă atomul ar fi încărcat electric.

Din experiență s-a văzut că este mult mai greu să-i adaugi electroni atomului și să-l faci negativ, decât să-i „iei”, să-i înlături un electron, făcându-l **ion pozitiv**.

Deci acesta ar fi planul: „tragem” cu un tun de electroni asupra unor atomi-țintă (aflați în faza gazoasă, ca să nu mai avem probleme că sunt ținuti strâns în rețeaua cristalină a solidului) și atunci electronii din tun care lovesc atomii dau afară din atomii ciocniți câțiva electroni, făcându-i astfel pe atomii ciocniți să devină ioni pozitivi.

Apoi alimentăm o grilă cu tensiune negativă și aceasta îi va deturna pe ioni pozitivi din drumul lor alături de electronii eliberați către tensiunea negativă.

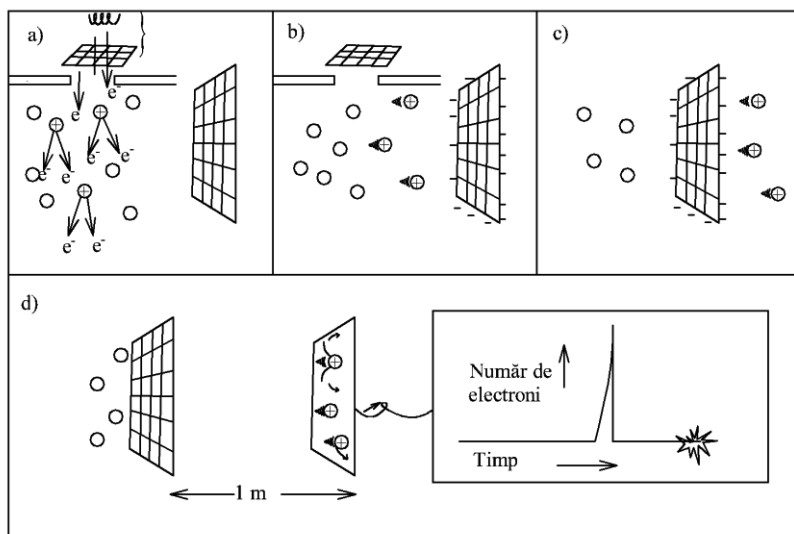


Fig. 7'.5

Este clar că grila îi va atrage în egală măsură și pe ioni pozitivi mai grei și pe cei mai ușori, evident, cei mai ușori având viteză mai mare. Apoi, ca într-o rețetă de bucătărie, lăsăm ioni pozitivi, grei și ușori, odată ajunși la grilă, să treacă mai departe,

să se „liniștească”, în lipsa oricărei forțe electrice care să le afecteze viteza, pe o distanță de, să zicem 1 m, ca să ne fie ușor la împărțire când vom afla viteza.

Și, în fine, îi facem să se ciocnească de un ecran unde am aplicat un material special care va elibera electronii săi proprii, în momentul în care sunt ciocniți de ioni pozitivi ajunși fiecare cu viteza lui.

Acești electroni vor fi selectați pe un fir care duce la un televizor și, acolo, conform principiului de deflectare a electronilor care trec printr-un câmp magnetic (cel al tubului televizorului), aceștia vor da un spot luminos proporțional cu numărul de electroni (adică, cu numărul de ioni de care au fost excitați la sosirea pe ecran). Putem măsura cu precizie timpul de zbor al ionilor spre ecran și tensiunea aplicată grilei așa că putem calcula masa foarte precis.

Poate veți fi triști că nu putem să „vedem” în mod individual atomii foarte bine, căci este ca și când, în loc să avem fotografiile colegilor de clasă, avem numai lista „greutății” fiecăruia. Totuși, vom afla multe din compararea maselor atomilor astfel detectate.

Înainte de aceasta, să precizăm niște „numere” importante în cele ce urmează, adică în descrierea atomului.

Deoarece energiile de care vorbim, când discutăm fenomenele la nivel atomic, sunt mult sub 1 Joule, s-a născut o nouă unitate de măsură (desigur derivată din Joule) și anume câtă energie este necesară pentru a ridica o sarcină de 1 electron ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$) cu o „treaptă” de potențial de 1V, iar această mărime s-a numit 1 electron-volt (simbol eV).

$$1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C} \cdot 1\text{V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{J}.$$

Dar cum electronii nu prea circulă singuri, de capul lor, ci măcar câte un mol împreună (un mol are cât numărul lui Avogadro N_A particule= $6,023 \cdot 10^{23}$), ar fi util să vedem exprimarea energiei unui mol în noua unitate de măsură, adică

$$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \text{ particule} = 96500 \text{ eV}$$

un număr celebru în fizica atomică, energia pentru a-i ridica unui mol de electroni cu 1V potențialul.

- Prezența similitudinilor și diferențelor dintre electronii tunului din fig.7'.5 a și cei ai sursei de ioni din figura a-c.

(R) Electronii din „tunul electronic” sunt obținuți prin încălzirea unor fire, așadar li se dă atomilor energie termică, iar aceștia eliberează electroni cu acest surplus de energie, care este mult prea puțină ca să miște atomul (masa atomului de hidrogen este de cel puțin 2000 ori mai mare decât a electronului); ca să nu mai vorbim de energiile necesare pentru constituenții nucleului!

Pe de altă parte, sursa de ioni pozitivi este gazul atomic care a fost bombardat cu electronii cei mai energetici, eliberați de ionii discutați mai sus.

Construcția atomului

Spectrometrul de masă “desface” electronii de atomi.

- Oare sunt electronii identici, indiferent de tipul de atom din care provin?

(R) Ca să verificăm acest lucru, facem ca energia grilei care atrage ionii (vezi figura 7'.5) să fie pozitivă și atunci ea va atrage electronii. Măsurăm și pentru aceștia timpul de parcurs.

Din experiment vedem că electronii au o viteză foarte mare spre deosebire de ionii pozitivi, pentru că sunt foarte ușori,

așa de ușori că atomul nici nu simte din punct de vedere al masei când pierde electroni - masa rămânând, aproximativ, aceeași.

Așadar, **electronii sunt toți la fel.**

Dar, măsurând mai multe feluri de ioni, proveniți de la diverse elemente, s-a găsit că cel mai “ușor” atom este cel de hidrogen, $1,66 \cdot 10^{-27}$ kg.

Știm acum că acesta are un singur proton pe care nu l-am putut sparge în bucăți mai mici cu metodele curențe, despre care vom discuta. Atunci, așa cum am procedat pentru energie, găsim o măsură mai potrivită lumii atomice, facem și pentru masă, considerând $1,66 \cdot 10^{-27}$ kg drept o **unitate atomică de masă** (**1 amu**=masa unui proton).

○ Dar dacă punem heliu (He) în spectrometru?

(R) Conform măsurărilor timpului său de zbor, rezultă că masa acestuia este 4 amu.

○ Rezultă oare că atomul neutru de heliu are 4 protoni și 4 electroni? (sarcina dintre protoni și electroni se neutralizează, iar masa atomului nu se datorează electronilor).

(R) Pentru a răspunde la această întrebare, mărim tensiunea sursei de electroni care bombardează heliul până când scoatem toți electronii din atomii de heliu.

Oricât de mult am crește tensiunea sursei, tot atâția electroni, și anume câte doi de fiecare atom putem scoate din fiecare atom de heliu.

Asta înseamnă că sunt numai doi protoni.

○ Ce se întâmplă cu celelalte 2 amu?

(R) Înseamnă că **mai există 2 neutroni, particule fără sarcină electrică, dar cu aceeași masă ca protonii.**

Așa sunt construiți atomii - protoni și neutroni în nucleu, fiecare de masă egală (aproximativ) unul cu altul și fiecare de 1837 ori mai mare decât masa electronului -, iar sarcina electrică este neutralizată: câți protoni, atâția electroni.

Avem așadar două caracteristici care definesc atomul:

a) masa - dată de protoni plus neutroni. Dacă nimic nu se schimbă ca sarcină atunci, câteodată, pot exista și neutroni în plus (atomii care au neutroni ”în plus” se numesc **izotopi**). Izotopii ponderați (adică adunați după proporțiile în care se găsesc în natură) formează **masa atomică** (A) - de aceea în tabelul lui Mendeleev, în dreptul lui A nu este un număr întreg, pentru că avem de a face cu o pondere.

b) sarcina - dată de protoni și neutroni. În atomii neutri, câți protoni, atâția electroni. Atunci când electronii sunt mai puțini decât protonii sau sunt în exces, atomul se numește ion pozitiv, sau negativ, după caz.

Numărul de protoni, Z , se numește **numărul atomic**. El definește elementul chimic, căci neutronii pot fi și mai mulți (vezi izotopii), iar electronii dau caracterul pozitiv (negativ) dacă nu sunt atâția cât protonii.

Elementele chimice

Suntem acum în situația de a defini elementele chimice.

Un element chimic este un grup de atomi ce au cu toții același număr de protoni.

În această definiție nu am inclus neutronii deoarece, după cum am spus, numărul lor poate varia fără a schimba semnificativ proprietățile electrice ale elementelor.

Și electronii au fost lăsați afară din discuție pentru că și ei pot părăsi ușor atomul, eventual revenind mai târziu.

Putem totuși să remarcăm că **masa medie** este o caracteristică a elementului și că aceasta se schimbă puțin de la o mostră de element la alta.

Natura statistică a Universului

Natura ondulatorie a materiei mai are și alte consecințe interesante ce afectează modul în care înțelegem legile cu care descriem natura.

Vedem astfel, după ce am studiat principiul de incertitudine că, atunci când prezicem rezultatul unui experiment folosind noile legi, *acesta nu mai poate să fie prevăzut cu orice precizie dorim.*

Dar legile mecanicii ondulatorii furnizează chiar mai multă informație decât atât.

Ele pot fi folosite pentru a prezice probabilități ale rezultatelor și nu rezultate exacte în fiecare caz.

Este ca și când am arunca o pereche de zaruri și am spune ce probabilitate este ca să obținem suma punctelor egală cu șapte.

Probabilitatea în acest caz este $1/6$.

Un astfel de calcul nu ne permite o prezicere absolută în ceea ce privește rezultatul aruncării.

Înseamnă doar că, dacă aruncăm zarurile de multe ori, de exemplu de o mie de ori, suma de șapte ar fi de așteptat să apară în circa o șesime din timp.

Experimentul cu două fante (făcut cu fotoni-lumină sau electroni) ilustrează această idee în modul cel mai convingător: să presupunem că se permite numai unui singur electron să treacă prin sistemul cu două fante și să ajungă la ecran/film.

Unde va ajunge el?

Legile mecanicii ondulatorii nu ne permit a prezice exact.

Se poate prezice că electronul va ateriza undeva în interiorul regiunii care apoi va deveni figura de interferență.

Suplimentar, putem să prezicem probabilitatea de a ajunge pe un minim al figurii de interferență sau pe un maxim (în sensul că o probabilitate este mai mare ca cealaltă).

Numai după ce mulți electroni trec prin sistem, numărul celor ajunși la fiecare locație ne dezvăluie probabilitatea relativă de a ajunge într-un loc sau în altul.

Procesele din Univers par a fi statistice în acest fel, cu o varietate de rezultate posibile pentru fiecare situație fizică în parte. Fiecare are o probabilitate de apariție, aceasta fiind determinată de legile naturii.

Rezultatul exact este întotdeauna îndoielnic, în dubiu, până când procesul are loc de fapt.

Întreaga idee este în contrast violent cu punctul de vedere rigid deterministic al mecanicii clasice.

Dimensiunea nucleară

Ce am spus până acum despre atom pare să contrazică legile electricității care se aplică obiectelor suficient de mari cât să le vedem.

De exemplu, cum de stă electronul negativ departe de nucleul pozitiv când acestea ar trebuie să se atragă și electronul să se “lipească” de nucleu?

Cum de stau doi protoni, ambii pozitivi, și nu se resping, așa cum știam că trebuie să se întâmple datorită forței coulombiene? (De fapt, n-am găsit niciun procedeu din cele pe

care le știm până acum ca să despărțim protonii, să scoatem un proton din atom).

Așadar, misterul, departe de a fi lămurit, aduce după el noi mistere.

La începuturile atomismului, s-a crezut că protonii și neutronii ocupă întreg volumul atomului și că electronii s-ar fi aflat undeva “înfipți” în această “plăcintă” de nucleoni (de fapt acestui model atomic Thomson i s-a și spus “cozonacul cu stafide”, stafidele fiind, bineînțeles, electronii).

Într-un fel era natural să se fi crezut că particulele care dau masa atomului să fie cele care ocupă aproape tot volumul acestuia. Dar acestea era numai simple presupuneri.

Știința are nevoie de probe.

● Cum ar putea fi obținute informații despre structura atomului?

(R) O idee îndrăzneță a fost să se bombardeze atomul cu “gloanțe fine” și din studiul ciocnirilor, al ricoșeurilor diverselor părți, să ne dăm seama ce ar fi pe-acolo.

E clar că gloanțele trebuiau să fie tot atât de “fine”, de mici, cât atomul și, atunci, din experiența spectrometrului de masă ne aducem aminte că puteam produce ioni (de exemplu ${}^4_2\text{He}$, numiți și particule alfa); poate acestea ar fi gloanțele potrivite!

Știm, de asemenea, că cele mai simple particule pe care le putem produce cu tehnicile noastre, pe lângă electroni, sunt protonii hidrogenului și “părțile” pozitive ale heliului, adică doi protoni împreună cu doi neutroni într-un același nucleu, această alcătuire fiind numită particula alfa, α .

Este evident că și de această dată avem o cunoaștere indirectă, în sensul că vrem să aflăm ce se află sub prelata unui

camion, dacă tragem cu mitraliera și vedem cum ricoșează gloanțele; așadar, nu ne uităm sub prelată!

Un pic deprimant pentru cei obișnuiți să afle totul direct cu simțurile, dar asta este tot ce putem face în domeniul atomic.

Și pentru ca experiența să fie foarte relevantă, s-a luat o foiță de aur (aurul are $Z=79$, adică 79 protoni și masa $A=196,96$), așadar am pus un ”perete” solid în fața lui ${}^4_2\text{He}$.

Foița de aur era subțire, dar asta tot înseamnă câteva sute de atomi grosime. Cum ar putea să treacă ceva din ”gloanțele” noastre prin acest blindaj formidabil?

Rezultatul a fost, însă, uimitor! În loc ca particulele alfa să fi deplasat, cât de cât, un atom de aur, sau să fi încetinit la trecerea prin aceste straturi de atomi, cele mai multe dintre ele au trecut, cum se spune, ”ca prin brânză”, ca și când atomii de aur nici nu ar fi fost acolo!

Fiecare ion a putut trece prin sute de atomi fără, aparent, niciun ”efort”.

Atomii trebuie atunci să fie în cea mai mare parte spațiu gol!

O altă minune a fost că o parte din ionii-bombe au ricoșat însă chiar și perpendicular, ca și când ar fi lovit ceva cu o masă incredibilă. Unghiurile mari de ricoșare au arătat că aceste câteva particule care s-au întors, s-au lovit de ceva mic, însă foarte masiv, dinăuntrul atomilor de aur.

Particula mică, extrem de densă din centrul atomului s-a numit nucleu. El este compus din protoni și neutroni.

Împrăștierea particulelor α , și trecerea lor printre nuclee, ne-a arătat că raza atomului de aur este de circa 100 000 ori mai mare decât raza nucleului. În aceste condiții densitatea nucleului

este de aproximativ $1,8 \cdot 10^{11} \text{ kg/m}^3$ — pe care o putem compara cu cea a plumbului (unul din cele mai dense elemente) care este de circa $11,3 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ - deci de circa 10^{13} ori mai mare!

Un cui făcut numai din protoni și neutroni ar cântări cât un avion!

Pe baza experimentelor descrise (spectrometrul de masă și bombardarea foiței de aur cu particule α), am căpătat informații importante, pe care le putem sintetiza după cum urmează:

a) **Nucleul atomului este compus din protoni și neutroni.** Nucleul este extrem de mic ($r \approx 10^{-15} \text{ m}$), dar **conține practic toată masa atomului**. Este imposibil de despărțit în bucăți prin metodele menționate până acum.

b) **Toți atomii unui element chimic aune au același număr de protoni.** Dacă atomul este neutru electric, atunci el are tot atâția electroni cât protoni. Numărul de neutroni poate să varieze de la atom la atom (dar numai cu un număr mic).

c) Electronii pot fi extrași sau adăugați cu ușurință atomilor, **formând astfel ioni**.

d) Atomul este compus în cea mai mare parte din spațiu gol. Particulele sunt foarte dense, dar relativ departe una de alta (nucleonii de electroni).

Notă: Este interesant, urmând pe Feynman, de făcut o mică analiză pe baza a ce știm până acum, pentru a ne da seama de dimensiunile atomului. Desigur că nu este foarte riguroasă, dar ideea este corectă.

Presupunem că avem un atom de hidrogen cu raza a . Am văzut la relația de incertitudine că $a \cdot p \geq \hbar$, unde p este impulsul, adică nu putem afla valorile coordonatei și impulsului unei

particule mai bine de atât, la nivel atomic, când le măsuram simultan.

Să luăm pentru ușurință $p = \frac{\hbar}{a}$, în cazul unui electron aflat la distanța a de nucleu.

Energia cinetică acestui electron este

$$E_{cin} = \frac{mv^2}{2} = \frac{m^2v^2}{2m} = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2ma^2}$$

Iar energia potențială, la o distanță a față de nucleu este

$E_{pot} = -\frac{e^2}{a}$, unde e este sarcina electronului (am văzut aceasta la Electricitate).

Atunci energia totală a electronului este

$$E = E_{cin} + E_{pot} = \frac{\hbar^2}{2ma^2} - \frac{e^2}{a}.$$

Știm că atomul se aranjează în așa fel încât să facă un compromis și electronul să aibă cea mai mică energie posibilă - aceasta este o problemă de minim și se rezolvă ușor când știi derivate, luând derivata față de mărimea pe care o căutăm egală cu zero (că este așa, se demonstrează la analiză, aici trebuie să fim crezuți pe cuvânt).

Rezultă că $\frac{dE}{da} - \frac{\hbar^2}{2ma^2} + \frac{e^2}{a}$, apoi cerem ca $\frac{dE}{da} = 0$ și obținem $a_0 = \frac{\hbar^2}{me^2} = 0,528 \cdot 10^{-10} \text{m}$.

Această distanță particulară se numește **raza Bohr** și am aflat că **dimensiunile atomice sunt de ordinul lui 10^{-10}m** , numit și angstrom, ceea ce este corect.

● Care ar fi energia electronului la această distanță?

(R) $E_0 = \frac{e^2}{2a_0} = \frac{me^4}{2\hbar^2} = -13,6 \text{ eV}.$

● Ce vrea să însemne o energie negativă?

(R) Înseamnă că electronul are mai puțină energie când este înăuntrul atomului, decât atunci când este liber. Adică, este legat. Înseamnă că pentru a scoate electronul din atom trebuie să-i dăm o energie de $13,6 \text{ eV}$ și așa îl ionizăm (aceasta se numește **un Rydberg de energie** și este energia de ionizare a hidrogenului).

Modelul ondulatoriu

Descoperirea nucleului atomic a pus aproape tot atâtea întrebări noi, la câte a răspuns.

● Cum se țin electronii înăuntrul atomului astfel încât să nu cadă pe nucleu (forța electrostatică între plus și minus trebuind să-i atragă)?

● Cum își mențin atomii mărimea, dimensiunile și de ce au toți atomii unui element chimic precizat aceeași mărime?

(R) Constatăm că electronii nu pot fi de repaus, deoarece forța electrică i-ar face să fie imediat accelerați spre nucleu. Pe de altă parte ei nu se pot mișca oricum, de exemplu ca planetele în jurul Soarelui, deoarece astfel de mișcări implică accelerații și sarcinile electrice accelerate produc radiație prin care își pierde energia, iar în acest caz ar trebui ca electronii să cadă pe nucleu.

La aceste mirări/întrebări s-a încercat un răspuns considerându-se că, **electronului, ca particulă, i se poate asocia o undă** care are lungimea de undă de cam aceeași mărime cu atomul. Așa cum am văzut și în exemplul numeric de mai sus, în care am găsit ordinul de mărime al atomului, această dimensiune minimă a atomului poate fi înțeleasă folosind noțiunile principiului de nedeterminare.

Ne amintim că principiul cere ca electronii, care sunt mărginiți într-un volum mic, trebuie să aibă lungime de undă mică și, astfel, viteză mare.

Notă: Cu un termen luat din engleză (existând și în franceză), această limitare/mărginire într-o zonă anume (spațiu, volum etc.) se numește **confinare** în fizică. Așadar, deseori se spune că electronul este “**confinat**” într-un spațiu anume.

Un volum de confinare mai mic necesită, așadar forțe atractive mai mari. Așadar, volumul atomic cel mai mic reprezintă echilibrarea făcută de natură în respectarea acestor cerințe. Adică acest spațiu este cel mai mic volum în care se poate ține (confina) un electron de către atracția sa exercitată de nucleu.

Când trebuie să descriem matematic această undă asociată electronului, în condițiile în care acesta este atras de nucleu, se găsește că **numai anumite feluri bine precizate de unde** pot să apară în interiorul volumului de dimensiuni atomice.

Fiecare fel de undă corespunde unui electron cu o anumită energie și o anumită formă.

Ce se înțelege prin „energie” și „formă” poate să fie uneori diferit față de ce ne-am aștepta. Forma nu este ceva circular, sau eliptic, precum orbitele planetelor.

Modelul ondulatoriu prezice numai probabilitatea de a găsi electronul într-o regiune din jurul nucleului (de aceea se numește **orbital** și nu orbită - orbita spune unde se află planeta în mod precis, la fiecare moment de timp, ceea ce nu e cazul cu electronul).

Situația este similară celei a pescarului care caută pește într-un lac tulbure. I se spune că este mai probabil să găsească pește într-o anumită zonă, de exemplu spre centrul bălții. Asta nu

înseamnă că nu ar putea găsi pește și la mal. Probabilitatea, însă, este mai mică.

Pe de altă parte, nu există o frontieră exactă de unde încolo să nu mai existe pește.

De aceea, orbitalul înseamnă zona în care putem găsi electronul în, să zicem, 90% din timp - tipuri de orbitali: s , p , d .

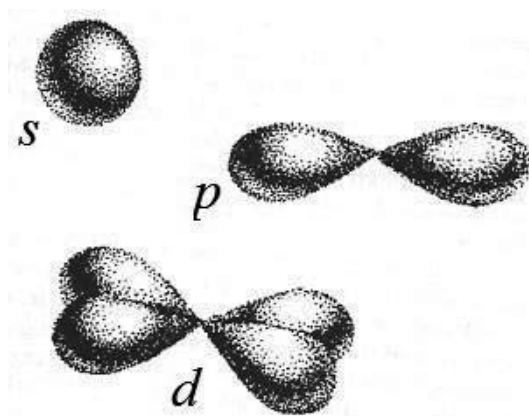


Fig. 7'.6

Modelul ondulatoriu nu permite orbite. **Electronii nu se mișcă dintr-un loc în altul printr-o mișcare din punct în punct, de-a lungul unui drum. Electronul nu are drum**, în sensul clasic al cuvântului. El este aici și apoi, hop, apare în altă parte, fără să fi fost nicăieri între aceste locuri, între timp.

Nu există drumuri, orbite, traiectorii, ci doar regiuni, de diverse probabilități.

Mai rău, densitatea de probabilitate a electronului nici nu este uniform distribuită în orbitalii care nu sunt sferici (p , d , f etc.)

Ca și cum am avea un material care este mai dens în anumite părți, iar din loc în loc, oriunde, mai rar!

- Figurile orbitalelor ne arată suprafețele pe care circulă atomul? Dacă nu, ce reprezintă aceste suprafețe?

(R) Suprafețele sunt numai limitele exterioare, frontierele orbitalului, adică limitele regiunii unde electronul își petrece cea mai mare parte din timp.

- Care este principiul științific ce spune că este imposibil de știut simultan poziția și viteza electronului în atom?

(R) Principiul de nedeterminare.

Spinul electronului

- Câți electroni pot să “locuiască” într-un orbital precum cel arătat în figură?

(R) Răspunsul depinde în ce fel electronii se află unii față de alții. Faptul că doi electroni au sarcini negative duce la o respingere puternică.

Această respingere este mediată de **o proprietate pe care i-o atribuim** electronului în plus față de masă și sarcina electrică.

Proprietatea se numește spin, mișcare de spin, deși termenul de mișcare este complet nepotrivit, dacă îl luăm în sens clasic. **Doi electroni pot sta împreună într-un orbital dacă au spinii opuși.**

De fapt spinii pot fi numai opuși sau în același sens, pentru electronii luați individual, iar faptul că spunem că electronul este o mică sferă ce se rotește în jurul propriei axe (spin, în engleză, înseamnă rotație) nu este corect, dar este un mod imaginativ de a înțelege structura atomică.

Dacă electronul se apropie de un magnet, spinul este forțat să aibă una din cele două posibile poziții (sus sau jos, să zicem, sau, în reprezentarea incorectă cu sfera, mișcare în sens

trigonometric sau inversul acesteia). De aici se vede că spinul are de a face cu momentul magnetic.

De altfel niciodată nu se poate măsura spinul, ci numai momentul său magnetic.

Însă pentru noi, la acest nivel, este suficient să subliniem că într-un atom nu pot fi decât două direcții de spin, și anume opuse (ca o curiozitate, direcțiile de spin care sunt, de fapt, opuse ca orientare în modelul nostru imaginativ cu electronul ca sferă, se numesc ... perpendiculare. De-ale cuanticii!).

Dacă electronii au direcțiile de spin opuse, atunci se pot afla în același orbital (aceasta este regula lui Pauli).

Putem să ne imaginăm, iarăși fără o legătură directă cu matematica, dar foarte util ca percepție, că acești spini îi țin pe electroni la distanță dacă sunt în același sens, iar când sunt opuși le permit electronilor să stea unul lângă altul în orbital, fără să se respingă definitiv.

În limbaj matematic, această proprietate a spinilor se traduce în faptul că “unde care descriu doi electroni aflați în același orbital nu vor interfera distructiv (adică nu se vor anula una pe alta) dacă acești electroni au spinii opuși (spinul se mai numește și moment cinetic de spin spre deosebire de momentul cinetic orbital pe care l-am instituit în mecanică, $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$).

Energia orbitalilor

Următorul pas ar fi să aflăm cât de greu este să scoatem un electron din atom.

Am văzut într-un exemplu că pentru hidrogen calculul a dat -13,6 eV.

Pentru a vedea corectitudinea calculelor noastre, facem experimente tot cu spectrometrul de masă - acolo dăm tensiune mai mare grilei tunului de electroni, adică dăm energie electronilor până când, prin ciocnire, scoatem toți electronii atomilor de gaz ciocniți.

Rezultatele măsurării energiilor acestor electroni (evident că sunt **energiile de ionizare** ale diverșilor atomi pe care îi luăm în stare gazoasă) le punem pe un grafic, ca mai jos.

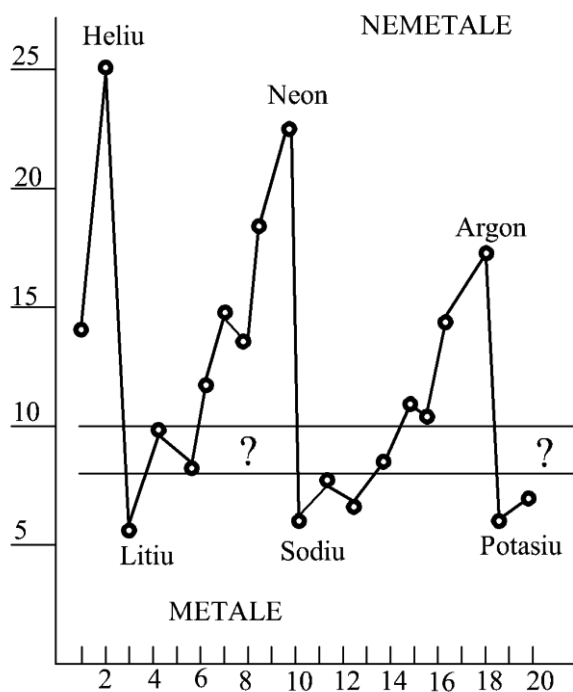


Fig. 7'7

Această energie se numește prima energie de ionizare și este diferită pentru diferite elemente. După ionizare, un ion cu sarcina +1 rămâne în locul atomului.

Dacă un electron cu “energia corectă” (și o să vedem ce înseamnă aceasta) îl lovește din nou, se poate întâmpla ca încă un

electron să fie îndepărtat din ionul cu sarcina +1. Acest proces poate continua până când toți electronii atomului inițial sunt îndepărtați.

Energia de ionizare poate fi identificată cu energia orbitalului din care a fost scos electronul.

În figura 7'.8 putem să vedem primele energii de ionizare ale unor atomi diferiți și ne imaginăm că nivelul de energie zero reprezintă o suprafață de teren, iar nivelele de energie ale electronilor din diferiții atomi reprezintă fundul fântânilor ce ar corespunde, să zicem, câte unui atom.

Putem spune astfel că electronul se află într-un “puț (fântână) de energie”, adică lui trebuie să i se dea o energie (energia de ionizare), astfel încât acesta să fie scos din puț la suprafață. Anumite proprietăți ale elementelor se corelează foarte bine cu energia de ionizare.

Energii de ionizare (eV)			
ELEMENT	Prima	A doua	A treia
H	13,6		
He	24,6	54,4	
Li	5,4	75,6	122,5
Be	9,3	18,2	153,9
B	8,3	25,2	37,9
C	11,3	24,4	47,9
N	14,5	29,6	47,4
O	13,6	35,1	54,9
F	17,4	35,0	62,7
Ne	21,6	41,0	63,4
Na	5,1	47,3	71,6
Mg	7,6	15,0	80,1

Fig. 7'.8

De exemplu, toate elementele a căror energie de ionizare este mai mică de 8eV se numesc **metale** și sunt strălucitoare, conduc bine electricitatea și sunt capabile să fie îndoite fără a se rupe. Tuturor elementelor cu energia de ionizare peste 10eV, pe de altă parte, le lipsesc aceste caracteristici.

Exemplele sunt carbonul (cărbunele), azotul și oxigenul (principalele gaze din aer), precum și heliul, neonul și argonul (gaze transparente, folosite în semnele colorate numite generic (“neoane”)) aceste ultime trei gaze sunt “chimic inerte” (adică “refuză” să se confine cu alți atomi spre a forma molecule). Pe acestea le numim **nemetale**.

Stări de oxidare

Un atom care a pierdut un electron se numește că este în starea de oxidare +1. De exemplu Li^+ . Un atom care a pierdut doi electroni se numește, în mod similar, ca fiind în starea de oxidare +2. De exemplu Be^{2+} . Desigur, pot fi și stări de oxidare negative, pentru toți atomii care primesc electroni în plus.

Până acum am vorbit numai despre atomi și ioni în faza gazoasă (așa am avut nevoie în spectrometrul de masă), dar aceștia pot exista în stare solidă sau lichidă, în particular, în apă.

Luând cazul elementelor aflate în mediu apos, putem spune că fiecare tip de ion se “ajustează” diferit în funcție de mediul apos.

Dacă ionul a pierdut prea mulți electroni, atunci va exista un loc liber (numit în fizică și “vacanță”) într-un orbital de energie joasă și, atunci, este probabil ca ionul să “fure” un electron din apropiere, adică din molecula de apă.

Procesul invers este la fel de posibil, căci ionii care au primit prea mulți electroni prezintă o probabilitate mare să respingă, să rejeteze (un alt termen des folosit) unul sau mai mulți din electronii în exces.

Așadar, anumiți ioni pot să existe “la nesfârșit” în apă. În apă există numai anumite stări de oxidare pe care un ion ar putea să le aibă (vezi fig.7'.9)

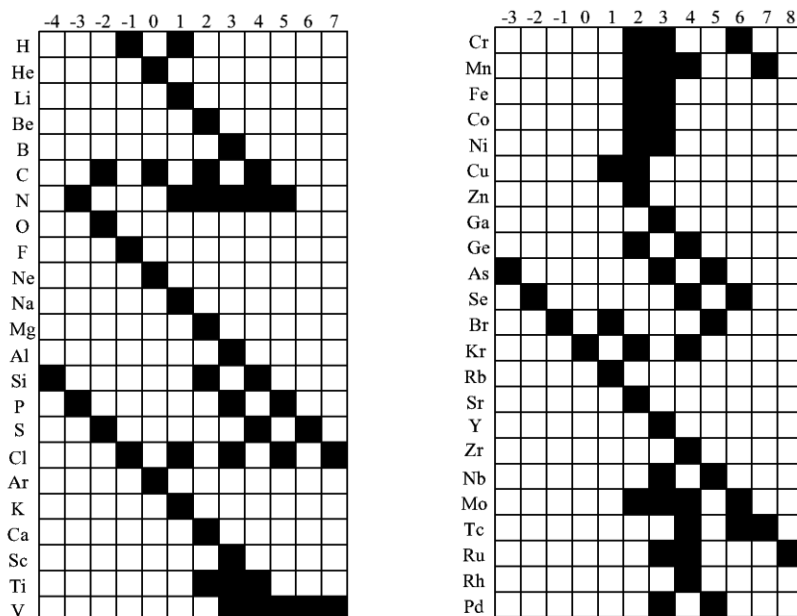


Fig. 7'.9

Spectrele de linie

Deși toate tipurile de atomi sunt construite din aceleași trei „cărămizi” de bază (protoni, neutroni și electroni), atomii diferă semnificativ unul față de altul.

Din definiția noastră, **elementele chimice sunt compuse din mai mulți atomi identici.**

Cum poate să apară o astfel de diversitate de caracteristici dintr-o simplă schimbare a numărului „cărămizilor” constitutive ale fiecărui atom?

Pe de altă parte, există familii chimice – grupuri de elemente chimice – care arată la fel și au proprietăți similare.

Membrii acestor familii nu sunt grupați împreună pe seama aceluiași număr de protoni, neutroni sau electroni; de fapt, membrii unei familii sunt adesea separți prin 8 protoni (și, corespunzător, 8 electroni).

● Cum se poate ca, adăugând încă 8 protoni, să obținem din nou aceleași proprietăți?

(R) Răspunsul se află în energiile orbitalilor, așa cum sunt acestea determinate de capacitatea sarcinii nucleare de a atrage electroni într-un volum de mici dimensiuni (în limitele cerute de principiul de incertitudine). Așadar, ar trebui să măsurăm cumva energiile acestor orbitali.

Să presupunem că bombardăm un atom cu fotoni care nu au suficientă energie ca să-l ionizeze. La anumite energii (cărora, în termeni de fotoni-lumină, le corespund anumite „culori”) fotonii vor trece „prin” atomi fără să interacționeze, dar, la alte energii, ei ar putea fi absorbiți.

Aceasta s-ar întâmpla când un orbital de energie mai înaltă, ar avea o vacanță (un loc liber) în orbitali, iar fotonul ar avea exact atâta energie încât să pună un electron în orbitalul liber (vezi figura 7'.10).

Energia fotonului corespunde frecvenței sale (“culorii”) conform relației $E=h \cdot \nu$ (constanta lui Planck (h) înmulțită cu frecvența (ν)).

Prin acest procedeu, ne-am putea da seama de diferența energetică dintre orbitali.

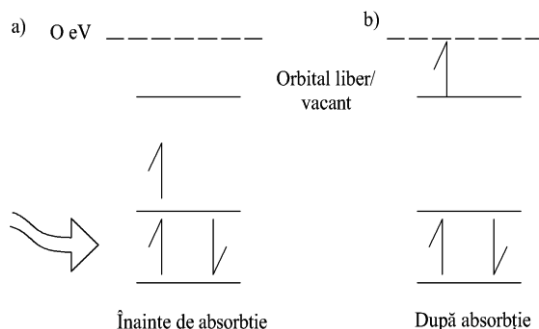


Fig.7'.10

Se poate întâmpla ca fotonul să aibă energia potrivită ca nu numai să salte un electron într-un alt orbital, ci să-l scoată complet din atom, dând naștere astfel fotoionizării (similar cu efectul de ionizare descris mai înainte, unde, însă, **electronii** ionizau atomii și nu fotonii).

Fotonul poate să scoată electronii (dacă are energia potrivită) din orice orbital, indiferent de câtă energie ar avea acesta înainte de ciocnire, deci, în acest mod, știind frecvența fotonului, putem afla pe ce nivel energetic se afla electronul pe care fotonul l-a scos din atom.

Fiecare atom are un număr mare de orbitali vacanți, așa că atomul poate absorbi un număr mare de fotoni de diferite energii (corespunzând de la ultraviolet, UV, până la infraroșu, IR).

Putem să demonstrăm acest lucru cu unul dintre gazele care absorb lumina vizibilă (adică fotonii cu energii asociate frecvențelor dintre roșu și violet).

Dacă trecem lumina albă (care cuprinde, după cum știm, toate lungimile de undă -frecvențele dintre violet și roșu- prin atomii acestui gaz, și, apoi, lumina rezultată trece printr-o prismă, se poate observa că din spectrul așteptat al curcubeului o să lipsească anumite culori, adică în locul culorii respective (sau al unei părți din acea culoare) o să se vadă o dungă neagră. Așadar,

anumite frecvențe „au dispărut”, adică anumite energii purtate de fotoni au fost absorbite de atomi, energiile au ridicat unii electroni de pe un orbital pe altul.

Dar putem face și un alt experiment interesant.

Într-o cameră întunecoasă, electronii sunt lăsați să treacă printr-un gaz aflat într-un tub de sticlă. Acești electroni îi pot excita pe alții aflați în atomii gazului și îi fac să treacă pe aceștia spre orbitalii liberi de nivel energetic mai înalt.

Niciun fel de lumină nu este implicată în acest proces, totuși, electronii care au fost excitați, „ridicați” pe orbitalii de energie mai înaltă, nu pot rămâne acolo. Ei cad în cascadă spre orbitalii liberi de energii mai joase și fiecare salt de la o energie mai înaltă la una mai joasă eliberează „picături de energie”, care înseamnă tot atâția fotoni de anumite frecvențe (culori).

Dacă pe aceștia îi observăm, vom vedea linii strălucitoare de diverse culori în întunericul camerei, și ceea ce vedem se numește **spectrul de linie**.

Fiecare element chimic are un spectru de linie caracteristic.

Cu formula de la început, ne reamintim că fiecare diferență de energie dintre orbitali corespunde frecvenței fotonului înmulțit cu constanta lui Planck (h).

Pe această bază s-au găsit caracteristicile gazului numit heliu (He) înainte ca el să fi fost descoperit.

Culorile prezise (frecvențele spectrului său) au fost detectate în jurul coroanei solare în timpul unei eclipse de soare din 1868. Heliul a fost descoperit întâi în Soare, înainte de a fi descoperit pe Pământ! Nu este de mirare că numele său vine din „helios”, cuvântul grec pentru soare.

Regularități printre orbitali

Cu ajutorul liniilor spectrale observate experimental și a calculelor ce se bazează pe teoria ondulatorie, s-au putut determina energii ale orbitalilor, atât ale celor care conțin electroni, cât și ale celor vacanți.

Relația dintre tipurile de orbitali și energiile acestora este una complexă, orbitalii formând o serie ce are distanțe precizate între elementele ei.

Pentru a înțelege mai bine relația dintr orbitali și energiile lor, putem face următoarea analogie (orbitalii vor fi tipurile de mașini ale unui producător, iar energiile lor vor fi puterile motoarelor acestor „mașini”):

- să zicem că luăm două elemente chimice diferite și să presupunem că acestea sunt doi producători de mașini, Dacia și Renault;
- fiecare marcă produce limuzine și autoutilitare, aceste tipuri de mașini ar corespunde tipurilor de orbitali, să zicem, în cazul nostru, s și p ;
- totuși, fiecare marcă de mașină își echipează autoturismele cu motoare diferite, astfel încât Dacia are motorul cel mai mic la limuzine de 1 litru, iar Renault are cel mai mic motor la limuzine de 2 litri.
- dar se poate întâmpla ca și la autoutilitare să fie o echipare cu motoare diferite, astfel încât cel mai mic motor de autoutilitară Dacia să fie mai mare decât cel mai bun motor de limuzină Renault (așadar, comparăm $2p_{\text{Dacia}}$ cu $2s_{\text{Renault}}$).

Dacă schimbăm Dacia cu ${}^2\text{He}^+$ și Renault cu ${}^1\text{H}$, avem chiar comparația reală dintre elementele chimice din figura 7'.11.

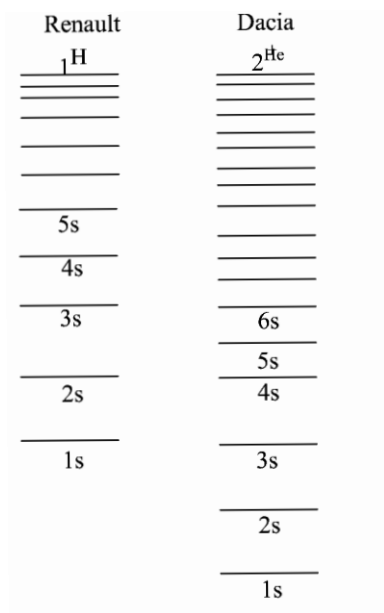


Fig. 7'.11

Este evident că pot exista și alte tipuri de autovehicule, adică orbitali *d* de exemplu etc. Oprim comparația aici.

De notat că orbitalii *p* apar întotdeauna ca tripleți, toți cei trei orbitali având aceeași energie (vezi figura 7'.12).

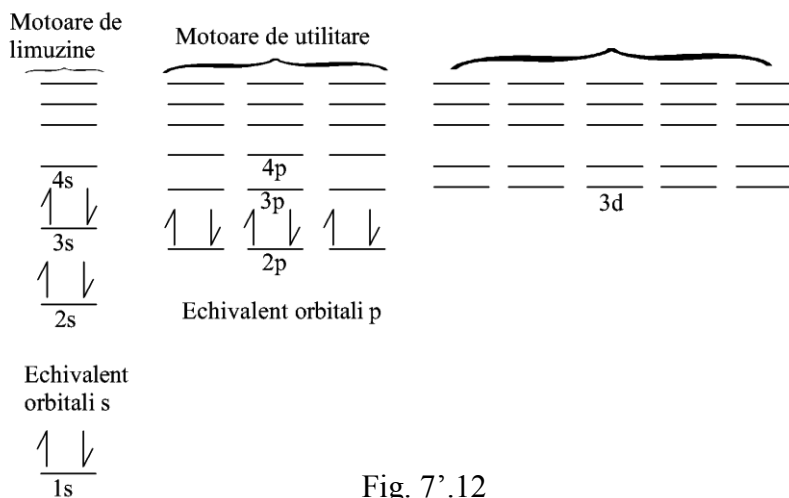


Fig. 7'.12

Asta înseamnă că până la 6 electroni pot să aibă aceeași energie, dacă se află pe orbitalii de tip p . Orbitalii d apar drept cvintupli.

O regulă este că atunci când orbitalii au aceeași energie și există numai câțiva electroni în acei orbitali, insuficienți ca să-i umple, electronii aceștia tind să se ducă în diverși orbitali de aceeași energie, astfel încât mai mulți (de fapt cât se poate de mulți) să aibă aceeași direcție de spin. (Aceasta este regula de umplere a orbitalilor, întâi se pun peste tot electronii cu același spin și apoi se “împerechează” cu ceilalți existenți).

Putem vedea în figura 7'.12 cum arată, în final, după toate regulile noastre, atomul de magneziu; cum se află așezate nivelele energetice în funcție de tipul de orbital.

În sinteză:

- un atom neutru are tot atâția electroni cât protoni;
- electronii se așează începând cu nivelul energetic cel mai de jos (mai “aproape” de nucleu, adică e nevoie de energia cea mai mare pentru a-i scoate de acolo, puțul de energie este cel mai adânc);
- ei se așează mai întâi astfel încât să fie toți de aceeași direcție a spinului; apoi își primesc perechea - electronul cu spinul opus;
- există mulți orbitali liberi/vacanți, de energii înalte;
- lumina, căldura sau bombardamentul particulelor pot să cauzeze electronilor de pe nivelele energetice joase să se ridice (să se excite) pe nivelele orbitalilor liberi, de energii înalte, ba chiar și să părăsească în întregime atomul (să-l ionizeze);
- electronii se întorc în mod spontan în orice loc liber (vacanță) existent la nivele joase; în acest proces ei emit lumină și cu ajutorul acesteia observăm liniile spectrale.

Modelul standard al particulelor

Tot ceea ce am spus despre relativitate, mecanică cuantică, fizică atomică și nucleară se assemblează astăzi în ceea ce numim Modelul Standard al Particulelor, adică o teorie încheată pe baza fizicii moderne, care explică „totul” din experiența noastră umană de zi cu zi (în afară de gravitație și, desigur, aspectele „umaniste” de tip conștiință, fericire etc.).

Se poate chiar schița un tablou aferent acestui Model Standard, care, de fapt, este echivalentul modern al tabelului lui Mendeleev; pe acesta îl vom prezenta în cele din urmă, dând însă în prealabil câteva mici explicații de ordin general pentru a înțelege mai bine „povestea” din spatele clasificării.

Așadar, vom împărți particulele după modul în care folosesc spațiul: unele se așază astfel încât să „îmbrățișeze”, să ocupe cât mai mult spațiu cu putință - acestea se vor numi **fermioni** -, iar celelalte sunt acele particule cărora le place să stea adunate cât mai multe la un loc, se stivuiesc unele peste altele, încât „să facă loc” la multe altele - acestea sunt **bosonii** - și, păstrând metafora, putem să le considerăm mai „generoase” decât fermionii în ceea ce privește folosirea spațiului ocupat; probabilitatea de a fi multe particule la un loc, în cazul bosonilor, crește cu cât sunt deja mai multe acolo.

Din această clasificare, putem vedea, cu un pic de imaginație, că fermionii sunt cei care dau tărie, soliditate obiectelor, de la scaune până la planete, căci aceștia îi resping pe alții care ar vrea să se „așeze” în același loc cu ei, nu suportă să fie adunați, striviți prin așezare unii peste alții, să existe în stive.

În schimb, bosonii pot să se așeze unii peste alții, doi, trei, milioane, ei putând în acest fel să se combine spre a deveni

particule purtătoare de forță, constituind astfel un câmp de forțe macroscopic.

🌀 Dar ce vrem să spunem prin faptul că „bosonii sunt particule purtătoare de forță”, ce înseamnă aceasta?

În fizica modernă se consideră că forța apare ca urmare a unui schimb de particule. Iar particula este considerată a fi rezultatul „vibrațiilor din câmp”.

(Fizicienii utilizează cuvinte ca „forță”, „interacțiune”, „cuplare” ca desemnând același lucru).

Deși pare mai ciudat, nu este foarte greu să ne imaginăm că ceea ce numim câmp ar fi o țesătură fină, aproape fără masă care, ciupită, trasă un pic în sus, de exemplu, ar da naștere unei mici ridicături ce se poate propaga apoi spre o margine a pânzei, ca și când pe dedesubt ar fi o gază ce se deplasează de colo-colo. Aceasta ar fi particula văzută ca vibrație a câmpului.

Apoi, ne imaginăm că forța gravitațională care apare între Pământ și Lună s-ar datora schimbului de astfel de particule, născute din vibrația unui câmp, pe care le-am numi **gravitoni**.

Similar, interacțiunea dintre electron și nucleu s-ar datora fotonilor.

Acesta este conceptul fizicii actuale.

În înțelesul acestei fizici, există doar patru tipuri fundamentale de forțe: de gravitație, electromagnetică, nucleară tare și nucleară slabă.

În afară de gravitație, s-a reușit înglobarea celorlalte trei într-un concept unitar, ceea ce reprezintă triumful fizicii moderne - explicarea varietății tulburătoare a lumii prin numai câteva ingrediente simple.

Desigur, că în limbajul de zi cu zi, forța (de accelerație a mașinii, de frecare pe planul înclinat etc.) are cu totul alt înțeles și noi concepem că aceste reprezentări macroscopice provin dintr-o foarte complexă combinație a forțelor fundamentale enumerate mai sus.

Acum câteva cuvinte despre „câmp”.

În teoria modernă, toate particulele apar cu adevărat din câmpuri - aceasta este teoria cuantică a câmpului.

Când ne gândim la câmp ne imaginăm că vorbim despre „ceva” care are o valoare oarecare în fiecare punct din spațiu - de exemplu temperatura, presiunea, umiditatea din atmosferă -, dar niciun astfel de câmp nu este fundamental; acestea sunt doar proprietăți ale atmosferei înseși.

Câmpul electromagnetic sau gravitațional, pe de altă parte, sunt **câmpuri fundamentale** - ele nu sunt făcute din nimic altceva, ele sunt „materialul” din care este făcută lumea!

După teoria cuantică a câmpului, absolut orice este făcut din câmp sau din combinații de câmpuri. Ceea ce numim particule sunt numai vibrații foarte fine în aceste câmpuri. Așadar, fiecare particulă despre care vorbim în Modelul Standard este, în cele din urmă, o undă ce vibrează într-un câmp anume. Fotonii care „duc” electromagnetismul, gravitonii asociați gravitației, gluonii răspunzători de forța nucleară tare etc., toate particulele sunt vibrații ce se propagă prin câmpurile respective, așa cum sunetele se propagă prin aer, iar noi observăm aceste vibrații drept particule.

Însă nu putem să încheiem, fără a spune câteva cuvinte despre ce este la modă în fizica de astăzi, și anume despre bosonul

Higgs - „particula lui Dumnezeu”, cea căreia, în interpretarea de azi, i se datorează faptul că electronul are masă.

În teoria câmpurilor, acestea au o valoare în fiecare punct din spațiu, iar când spațiul este complet gol, valorile respective sunt zero.

Dar ce înseamnă „gol”?

Înseamnă atât de gol pe cât se poate sau, mai precis, „încât să aibă cât de puțină energie posibil”. După această definiție, câmpurile gravitațional, electromagnetic etc. sunt zero când spațiul este cu adevărat gol. Când se află la o altă valoare decât zero, înseamnă că au energie și, deci, spațiul nu este gol. Toate câmpurile au mici vibrații datorită nedeterminării intrinseci a mecanicii cuantice, dar acele vibrații au loc în jurul unor valori medii care sunt în mod tipic egale cu zero.

Câmpul bosonului Higgs (o particulă, în sensul descris mai înainte, căutată la CERN, în marele accelerator de particule numit LHC și, după câte s-a anunțat, găsită) este diferit.

Acest câmp, ca oricare altul poate fi zero sau să ia orice altă valoare. Dar, acest câmp „nu vrea” să fie zero - el vrea să stea la o anumită valoare diferită de zero, oriunde în Univers. Câmpul Higgs are mai puțină energie când este nenul și mai multă energie când este zero!

Rezultatul este că tot spațiul se umple de câmpul Higgs. Câmpul Higgs este un câmp prezent în fiecare punct din Univers și el face posibile interacțiile slabe, în același timp dă masă fermionilor elementari (printre care se află și electronul).

Bosonul Higgs este o vibrație a acestui câmp, în jurul valorii sale medii. Din cauză că particula Higgs este un boson, ea dă naștere unei forțe a naturii. Două particule care trec una pe

lângă alta interacționează schimbând bosoni Higgs, așa cum două particule încărcate cu sarcină schimbă între ele fotoni ca mod de interacțiune.

Dar nu forța Higgs dă masă particulelor, ci numai câmpul Higgs care se află peste tot (ca un fundal), furnizând mediul prin care celelalte particule trec, afectându-le în acest fel proprietățile pe măsură ce trec prin acest câmp.

Ce este important de știut despre acest câmp este că trecerea prin el nu influențează viteza de mișcare a particulei, deoarece acest câmp nu are propria-i viteză.

Intrebarea care ne vine în minte atunci ar fi dacă nu cumva acest câmp nu este similar „eterului” despre care fizicienii presupuneau că există ca suport al undelor electromagnetice, așa încât acestea să poată vibra?

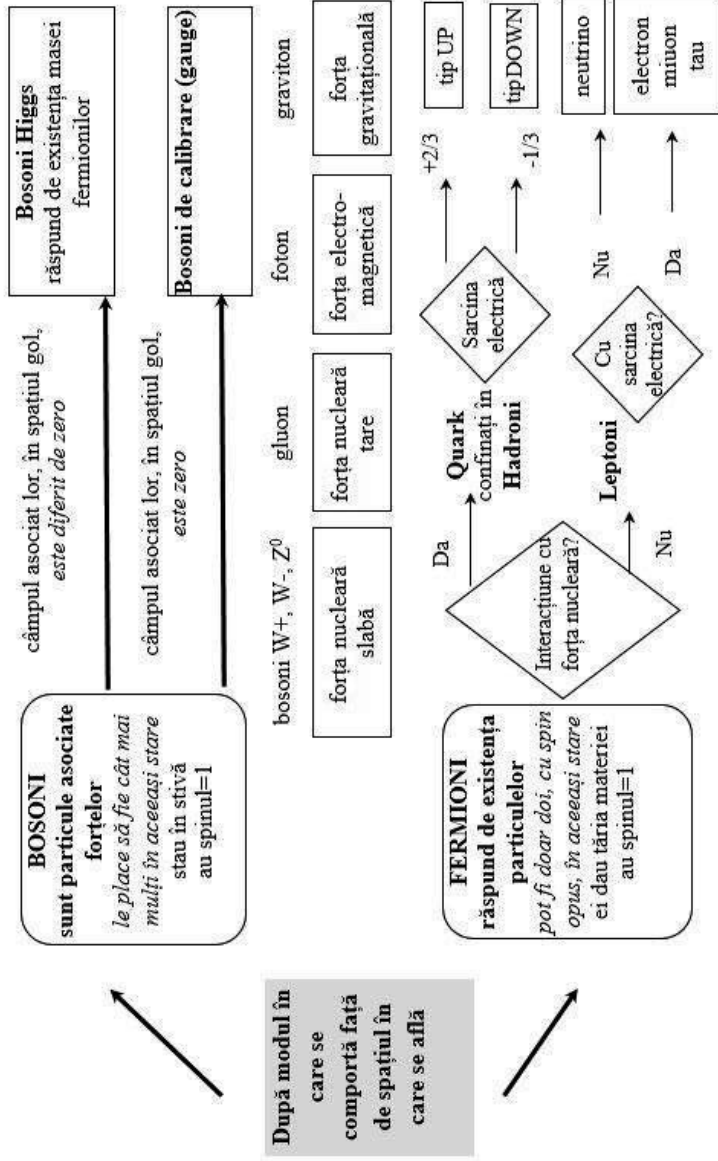
Geniul lui Einstein a înlăturat această posibilitate, căci lumina având viteză constantă pretutindeni, eterul nu mai era necesar ca explicație.

🌀 Este oare vreo diferență între câmpul Higgs și un nou posibil „eter”?

Da. Căci necesitatea eterului a apărut din faptul că atunci conta cât de repede se face mișcarea prin el - aceasta definea starea de repaus a spațiului gol.

În timp ce în câmpul Higgs, care nu afectează viteza, acest lucru nu contează. Relativitatea funcționează foarte bine în acest câmp.

Modelul Standard al Particulelor



Iar în încheiere, o ultimă întrebare:



„Cum credeți că vă pot ajuta Fizica și Matematica în meseria viitoare ?“

Există un răspuns din partea marilor maeștri:

„Fizica nu este doar o colecție de fenomene extrase în timp din observarea lumii înconjurătoare sau din experimente imaginate.

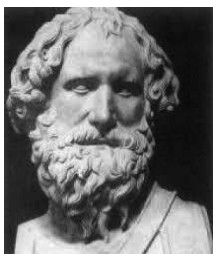
Sunt esențiale **înțelegerea celor studiate, capacitatea de a ne mira, curiozitatea permanentă**, începând cu modul de funcționare a atâtor dispozitive minunate din jurul nostru.

O idee fanion este aceea a stabilirii de legături între mărimile accesibile măsurătorilor directe și a celor inaccesibile, care pot fi deduse prin rezolvarea unor ecuații sau a altor mijloace de introspecție . Fizica este o știință a naturii, în timp ce Matematica este un limbaj asimilat cu o știință a gândirii. Toate legile fizice au formulări matematice, iar computerele au cimentat această apropiere.

Nu putem accepta preceptul defetist: “ce nu înțeleg este neimportant“, uitând dictonul mobilizator “invent or perish !“.

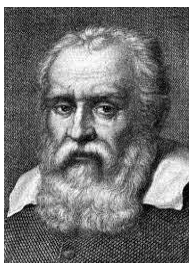
MARI FIZICIENI AI LUMII

Arhimede



Arhimede din Siracuza a fost un învățat al lumii antice, principalul om de știință din Antichitate. A pus bazele hidrostaticii și a explicat legea pârgھیilor. O mare parte a lucrărilor de inginerie ale lui Arhimede au izvorât din satisfacerea nevoilor orașului Siracuza.

Galileo Galilei (n.1564-d.1642)



Într-o vreme când se credea că Soarele se învârte în jurul Pământului, iar doctrina Bisericii nu permitea ca această credință să fie combătută, Galileo a avut curajul să își publice descoperirile și observațiile referitoare la mișcarea Pământului și imobilitatea Soarelui. Pentru a ajunge la descoperirile sale, s-a folosit de matematica rapoartelor și proporțiilor. A fost judecat și pedepsit de către Inchiziție, dar acum este considerat părintele științei moderne.

Isaac Newton (n.1642-d.1726)



Isaac Newton, născut la Woolstrophe Manor, Anglia, a fost o persoană introvertită care a dat noi direcții opticii, mecanicii și dinamicii celestiale. Aceste concepte sunt rezultatul deceniilor de gândire și analiză. A avut o pasiune pentru alchimie, care a durat aproape treizeci de ani.

Întrebat fiind cum a ajuns la teoria gravitației universale, răspunsul lui a fost: “Gandindu-mă la ea încontinuu!”.

Newton a fost, fără îndoială, cel mai creativ geniu din fizică.

Augustin

Fresnel

(n.1788-d.1827)

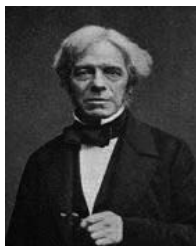


Fizician și inginer francez, a adus contribuții deosebite în domeniul opticii ondulatorii. În 1816 a demonstrat că principiul lui Huygens, împreună cu propria sa teorie privind interferența, pot explica propagarea liniară a luminii și fenomenul de difracție. A inventat un nou tip de lentilă, numită lentilă Fresnel, care este utilizată în construcția farurilor maritime. Deși studiile sale în optică nu au primit recunoaștere publică în timpul vieții, multe dintre tezele și lucrările sale au fost publicate de “Académie des Sciences”, la câțiva ani de la dispariția sa.

Michael

Faraday

(n.1791-d.1867)



S-a născut într-un cartier sărac din Londra. Familia și religia, fiindu-i alături, l-au ajutat să facă primul pas în carieră, Faraday urmând să devină unul dintre cei mai mari oameni de știință ai timpurilor sale. A ales să cerceteze forțele naturii, el însuși fiind socotit o forță a naturii. A făcut cercetări importante în electromagnetism, descoperind două legi importante ale electricității. Către public a spus: “Nu sunt poet, dar dacă gândiți pentru voi, așa cum fac eu, faptele vor forma o poezie în mintea voastră!”

Robert Mayer

(n.1814-d.1878)



Fizician de origine germană, care a urmat studiile universitare în medicină, el a observat că sângele marinarilor are o culoare diferită în regiunile tropicale, față de cele nordice, realizând că între căldură și lucru mecanic există o legătură. Perseverența l-a împins să determine echivalentul mecanic al căldurii și să găsească relația dintre căldurile molare ale gazelor la presiune și la volum constant.

A avut numeroase dispute cu James Joule, fiecare având propriile studii privind conceptul de energie.

James Joule
(n.1818-d.1889)



Fizician englez, fără studii universitare sau educație formală în oricare dintre științe, a fost ignorat la început de către societatea științifică. În ciuda statutului de amator, izolat și neglijat, a reușit să rezolve misterele proceselor de conversie. Interesul lui principal a fost să determine echivalența dintre efectele termice, electrice și chimice. În anii 1840, măsurătorile lui Joule erau fascinante sau deranjante (din punctul unora de vedere).

Prin cercetările lui, a arătat clar că “ceva” era convertit și conservat și a dat indicii vitale despre acel “ceva”.

**Hermann
Helmholtz**
(n.1821-d.1894)



Hermann Helmholtz, fizician german, a fost educat pentru o carieră în medicină. Fiind un pragmatic, el a explorat frontiera dintre fizică și fiziologie, creând o nouă știință - biofizica. Este recunoscut pentru studii privind conservarea energiei precum și pentru cercetări în electromagnetism.

A fost un talentat om de știință, cu o imensă capacitate de a lucra. Sesiuni intense de efort mental îl extenuau uneori, dar se revitalizează în cel mai scurt timp continuându-și cu pasiune investigațiile științifice.

**Rudolf
Clausius**
(n.1822-d.1888)

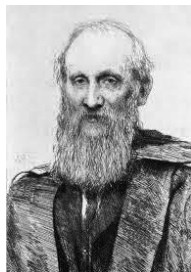


S-a născut la Köslin, Polonia și a urmat studiile la Universitatea din Berlin. Este considerat părintele termodinamicii; a pus bazele teoriei căldurii.

Munca sa privind primul și al doilea principiu ale termodinamicii a avut o influență enormă în ce privește termodinamica, recunoscută spre începutul secolului XX.

În 1865, Clausius a oferit prima versiune matematică asupra conceptului entropiei. El a sumarizat astfel: „Energia universului este constantă. Entropia universului tinde spre un maxim.”

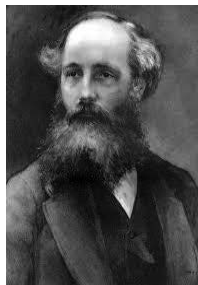
**William
Thomson**
(n.1824-d.1907)



Fizician britanic, devenit în 1892 Lordul Kelvin, este cunoscut pentru teoria temperaturii absolute, pentru conceperea primului telegraf care transmitea peste Atlantic, calcularea vechimii Pământului etc. A excelat în rezolvarea problemelor de știință cu o abordare originală. Caracterizat drept „o persoană pierdută în munca sa”, a scris 661 de lucrări și a patentat 69 de invenții.

A mărturisit că: „Un singur cuvânt caracterizează eforturile mele privind avansul științific din ultimii 55 de ani; acel cuvânt este – eșecul.”.

**James Clerk
Maxwell**
(n.1831-d.1879)



Considerat un gânditor arhitectural, James Maxwell, născut în Scoția, a formulat teoria clasică a radiației electromagnetice, alăturând pentru prima dată, electricitatea, magnetismul și lumina, ca manifestări ale aceluiasi fenomen.

Prin descoperirile lui privind câmpurile electrice și magnetice care călătoresc ca unde cu viteza luminii în spațiu, a creat baza pentru mecanica cuantică. De-a lungul activității sale a făcut descoperiri în ce privește: teoria moleculară a gazelor, termodinamică, inelele lui Saturn, vederea color.

Willard Gibbs
(n.1839-d.1903)



Om de știință american, a adus contribuții teoretice importante în fizică, chimie și matematică. Împreună cu James Maxwell și Ludwig Boltzmann, a creat mecanica statistică, explicând legile termodinamicii. A dezvoltat tehnicile de calcul vectorial.

Despre el se spune că a fost o persoană care „nu aștepta nimic, absolut nimic din exterior”. Puterea lui de concentrare era extraordinară; îi plăcea să sorteze, să eticheteze și să compare; să fie detectiv printre indicii.

**Ludwig
Boltzmann**

(n.1844-d.1906)



Fizician austriac, cu mari realizări în ce privește dezvoltarea mecanicii statistice. A lansat teoria cinetică a gazelor și a fost unul dintre fondatorii mecanicii statistice. Boltzmann a abordat o diversitate de fenomene; opera sa cuprinde articole despre matematică, chimie și fizică, precum și filozofie. Era renumit ca un bun experimentator, în ciuda vederii slabe. În același timp, Boltzmann a fost un atomist, care și-a dat seama de posibilitatea existenței unei lumi subatomice.

Max Planck

(n.1858-d.1947)

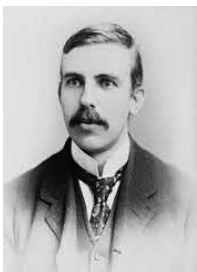


Teoretician german, care a elaborat teoria cuantică, a revoluționat înțelegerea umană privind procesele atomice și subatomice. În adolescență i s-a recomandat, de către profesorul său de fizică, să nu continue cu studiul fizicii, întrucât totul fusese descoperit deja.

A devenit cunoscut ca “vocea Germaniei în cercetarea științifică”. Planck a adus contribuții și în fizica teoretică, dar este cunoscut ca promotorul teoriei cuantice, care i-a adus premiul Nobel în Fizică, în 1918.

**Ernest
Rutherford**

(n.1871-d.1937)

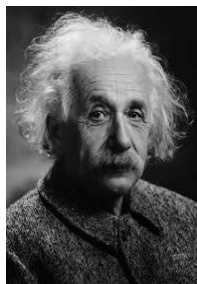


Fizician neozeelandez, Lordul Rutherford de Nelson, este cunoscut ca fiind părintele fizicii nucleare. A descoperit timpul de înjumătățire și protonul; a formulat ipoteza alcătuirii protono-electronice.

A crezut în simplitate, spunând că: “ Dacă un principiu din fizică nu poate fi explicat unei barmanițe, atunci problema este principiul, nu barmanița”. Pentru el, simplitatea era reprezentată de conceptele concrete și vizuale, cu matematică minimală și echipamente tehnice elementare.

Albert Einstein

(n.1879-d.1955)



Fizician teoretician, născut în Germania, Albert Einstein este autorul teoriei relativității și unul dintre cei mai mari oameni de știință ai omenirii.

A revoluționat fizica cu teoriile relativității restrânse și generalizate, cosmologia, teoria capilarității, teoria cuantelor, proprietățile termice ale luminii, teoria radiației și geometrizarea fizicii.

În 1921 a primit premiul Nobel pentru Fizică.

Einstein a spus că dovada inteligenței nu este cunoașterea ci imaginația.

Niels Bohr

(n.1885-d.1962)



Fizician danez care a adus contribuții fundamentale pentru înțelegerea structurii atomului și teoriei cuantice.

Bohr a reușit să ajungă în miezul celor mai dificile probleme din fizica cuantică. Era fascinat de modelul nuclear al atomului.

Energia și tenacitatea lui Bohr, prin lucrările lui fără greșală, păreau aproape supraumane. Fiecare cuvânt, propoziție, concept sau ecuație erau recitate și recorectate.

A primit Premiul Nobel în Fizică în 1922.

Louis de Broglie

(n.1892-d.1987)



Louis Victor Pierre Raymond, al VII-lea Duce de Broglie, a adus contribuții substanțiale teoriei cuantice.

În cadrul tezei sale de doctorat, a formulat o ipoteză curajoasă privind particulele, și anume că acestea au o natură duală, corpusculară și ondulatorie.

A propus o formulă de calcul a lungimii de undă asociată unei particule elementare, în funcție de impulsul particulei.

A primit, în 1929, Premiul Nobel în Fizică

**Wolfgang
Pauli**

(n.1900-d.1958)



Teoretician austriac, Wolfgang Pauli face parte din generația a doua de fizicieni în cuantică, fiind unul dintre cei mai străluciți și influenți membri.

Un perfecționist desăvârșit, a devenit cunoscut în comunitatea fizicienilor drept “conștiința fizicii”. A enunțat principiul excluziunii și a adus contribuții majore în fizica nucleară și fizica particulelor. A primit premiul Nobel în Fizică în anul 1945.

**Werner
Heisenberg**

(n.1901-d.1976)



Născut la Würzburg, Germania, Werner Heisenberg a aprofundat prin cercetare cele mai importante probleme teoretice în fizica cuantică.

A propus formularea matriceală a mecanicii cuantice, descoperind și principiul incertitudinii.

Un rol controversat l-a avut în timpul celui de-al Doilea Război Mondial, fiind conducătorul cercetărilor privind fisiunea nucleară. A primit premiul Nobel în Fizică în anul 1932.

Enrico Fermi

(n.1901-d.1954)

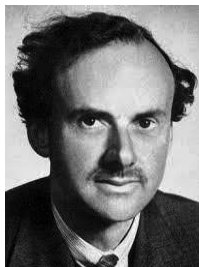


Fizician italian, considerat “părintele bombei atomice”, Enrico Fermi a adus contribuții importante în dezvoltarea teoriei cuantice și a fizicii nucleare și a particulelor.

A indus prima reacție nucleară în lanț artificială în cadrul Proiectului Manhattan.

Precum Newton, Fermi a reușit să fie în egală măsură un teoretician și un fizician experimental de excepție. A primit premiul Nobel în Fizică în 1938.

Paul Dirac
(n.1902-d.1984)



Teoretician englez, Paul Adrien Maurice Dirac, a adus contribuții fundamentale în dezvoltarea mecanicii cuantice și electrodinamicii cuantice.

Considerat o persoană precisă, tăcută și modestă, a formulat ecuația lui Dirac, care descrie comportamentul fermionilor și a prezis existența antimateriei. A dezvoltat teoria câmpului cuantic și a sugerat existența monopolilor magnetici.

Bohr a spus despre el: “Dintre toți fizicienii, are sufletul cel mai pur.” A primit premiul Nobel în Fizică în anul 1933.

Richard Feynman
(n.1918-d.1988)



Fizician american, a studiat la MIT și a urmat doctoratul la Universitatea Princeton.

A adus numeroase contribuții în electrodinamica cuantică, a dezvoltat diagramele Feynman – mod fundamental de rezolvare în teoria cuantică, dar și nucleară, teoria corzilor etc

Se spune că rezolva probleme în minte de cum se trezea, în timp ce conducea mașina, chiar și când se afla în restaurant. Era curios în legătură cu toate. Motorul vieții sale a fost curiozitatea nestăvilită.

A primit premiul Nobel în Fizică în anul 1965.

Max Born
(n.1882-d.1970)



Fizician și matematician german, a adus contribuții în mecanica cuantică precum și în fizica solidului și optică.

A dat prima formulare matematică exactă al Principiului I al termodinamicii.

Alături de Heisenberg și Jordan, a formulat toate aspectele mecanicii cuantice în versiunea matriceală. A primit premiul Nobel în Fizică în anul 1954.

CRONOLOGIA EVENIMENTELOR CRUCIALE ÎN FIZICĂ

- 1564 - Galileo Galilei se naște la Pisa, Italia.
- 1591 - Legendară demonstrație a lui Galileo la Turnul din Pisa.
- 1632 - Galilei publică „Dialoguri asupra a două sisteme majore ale lumii”. Inchiziția îi ordonă să înceteze publicarea.
- 1633 - Galilei apare în fața Inchiziției.
- 1638 - Galilei publică „Discursuri asupra a două noi științe”.
- 1642 - Galilei moare la Arcetri, Italia.
- Se naște Isaac Newton la Woolsthorpe, Anglia.
- 1661 - Newton intră la „Trinity College” din cadrul Universității Cambridge.
- 1665 - Ciumă în Anglia. Newton începe să lucreze la analiză matematică, gravitație și optică.
- 1668 - Newton este numit profesor de matematică (Lucasian) la Cambridge.
- 1671 - La Societatea Regală este prezentat telescopul cu reflexie al lui Newton.
- 1687 - Newton publică „Principiile matematice ale filozofiei naturale”.
- 1704 - Newton publică „Optică”.
- 1727 - Newton moare la Londra.
- 1791 - Michael Faraday se naște la Newington, azi Londra.
- 1796 - Sadi Carnot se naște la Paris.
- 1801 - Thomas Young efectuează experimentul său de interferență, explicat pe baza teoriei undulatorii a luminii.
- 1814 - Robert Mayer se naște la Heilbronn, Germania.
- 1818 - James Joule se naște la Manchester, Anglia.
- 1820 - Are loc experimentul lui Hans Christian Oersted ce demonstrează că un curent electric străbate un fir conductor, dând efecte magnetice.

- 1821 - Hermann Helmholtz se naște la Postdam, Germania.
- Augustin Fresnel caracterizează lumina ca undă în care oscilațiile au loc perpendicular pe direcția de mișcare.
- 1822 - Rudolf Clausius se naște la Koslin, Prusia.
- 1824 - Carnot publică „Reflecții asupra motivului puterii focului”
- William Thomson se naște la Belfast, Irlanda de Nord.
- 1831 - Faraday descoperă inducția electromagnetică .
- James Clerk Maxwell se naște la Edinburgh, Scoția.
- 1832 - Carnot moare la Paris.
- Faraday formulează legile electrochimiei.
- 1843 - Clapeyron publică versiunea matematică a teoriei lui Carnot
- 1837 - Faraday studiază inducția electromagnetică.
- 1839 - Willard Gibbs se naște în New Haven, Connecticut.
- 1843 - Joule publică prima sa determinare a echivalentului mecanic al căldurii.
- 1844 - Ludwig Boltzmann se naște la Viena.
- 1845 - Mayer publică calculul echivalentului mecanic al căldurii.
- Thomas își publică teoria matematică a liniilor de forțe electrostatice.
- Faraday observă efectul câmpului magnetic asupra luminii polarizate.
- 1847 - Joule publică rezultatele experimentului său celebru pentru determinarea echivalentului mecanic al căldurii.
- Helmholtz publică „Asupra conservării forței”.
- 1848 - Thomas publică principiul său termometric.
- 1850 - Clausius publică articolul despre teoria căldurii cu care introduce funcția U și obține ecuația: $dQ = dU + pdV$

- 1854 - Thomas definește temperatura absolută în termenii funcției lui Carnot.
- Clausius publică un articol despre teoria căldurii în care obține funcția de stare care mai târziu va fi entalpia.
- Maxwell publică primul său articol despre electromagnetism „Asupra liniilor de forțe ale lui Faraday”.
- 1857 - Clausius publică primul său articol despre teoria moleculară a gazelor.
- 1858 - Max Planck se naște în Kiel, Germania.
- 1860 - Maxwell publică primul său articol asupra teoriei moleculare a gazelor.
- 1864 - Walther Nernst se naște în Briesen, Prusia occidentală.
- 1865 - Clausius publică ultimul său articol despre teoria căldurii în care prezintă cele două legi ale termodinamicii.
- 1867 - Faraday moare la Hampton Court, Anglia.
- 1871 - Maxwell este numit șeful catedrei de fizică experimentală de la Cambridge.
- Ernest Rutherford se naște la Nelson, Noua Zeelandă.
- 1873 - Maxwell publică „Tratatul despre electromagnetism”.
- 1876 - Gibbs publică „Asupra echilibrului substanțelor eterogene”.
- 1878 - Mayer moare la Heilbronn, Germania.
- 1879 - Maxwell moare la Cambridge, Anglia.
- Albert Einstein se naște la Ulm, Germania.
- 1885 - Niels Bohr se naște la Viena.
- 1888 - Clausius moare la Bonn, Germania.
- 1889 - Joule moare la Sale, Anglia.
- Edwin Hubble se naște în Marshfield, Missouri.
- 1892 - Louis de Broglie se naște la Dieppe, Franța.
- 1893 - Nernst publică manualul său, Chimie Teoretică.
- 1894 - Helmholtz moare la Berlin.

- 1896 - Boltzmann publică primul său volum de cursuri despre teoria gazului.
- Henry Becquerel descoperă radioactivitatea uraniului.
- 1898 - Boltzmann publică al doilea volum de cursuri despre teoria gazului.
- Marie și Pierre Curie anunță descoperirile lor despre Poloniu și Radiu.
- 1900 - Planck publică lucrarea sa despre radiațiile asupra unui corp negru, în care, într-un mod limitat, introduce conceptul de cuantificare a energiei.
- Wolfgang Pauli se naște la Viena.
- 1901 - Gibbs publică Principiile elementare în mecanica statistică
- Werner Heisenberg se naște la Wurtzburg, Germania.
- Fermi se naște la Roma.
- 1902 - Rutherford și F.Soddy publică o serie de lucrări în care este dezvoltată teoria transmutației (radioactivității).
- Einstein este numit expert tehnic de clasa a III-a, la Bern, Elveția, Oficiul pentru brevete.
- Paul Dirac se naște la Bristol, Anglia.
- 1903 - Gibbs moare în New Haven, Anglia.
- 1905 - Einstein publică lucrările sale despre relativitate, efectul fotoelectric și particule coloidale ca molecule.
- 1906 - Nernst publică teorema sa despre căldură.
- Rutherford descoperă împrăștierea particulelor α .
- Boltzmann moare la Duino, Italia.
- Pierre Curie moare la Paris.
- 1907 - Thomson moare în apropiere de Largs, Scoția.
- 1909 - Hans Geiger și Ernest Marsden publică lucrarea despre împrăștierea α -particulelor de către folii metalice.
- 1910 - Subrahmanyam Chandrasekhar se naște la Lahore, atunci aparținând de India, acum de Pakistan.
- 1911 - Rutherford propune modelul nuclear al unui atom.

- 1913 - Einstein se mută la Berlin.
- Bohr publică lucrarea sa despre structura atomilor și a moleculelor.
- 1913 - Henry Moseley publică lucrările sale despre spectrul razelor X al elementelor.
- 1915 - Einstein publică lucrarea sa despre relativitatea generală.
- 1918 - Richard Feynman se naște la Far Rockway, New York.
- 1919 - Rutherford devine director al Laboratorului Cavendish în Cambridge.
- 1921 - Este inaugurat Institutul Bohr la Copenhaga.
- 1923 - Louis de Broglie prezintă teoria dualității materiei undă -particulă
- 1924 - Hubble raportează măsurătorile distanței cosmice realizate dincolo de galaxia noastră.
- 1925 - Heisenberg publică lucrarea despre mecanica matriceală.
- Max Born, Heisenberg și Pascual Jordan publică lucrarea completă despre mecanica matriceală.
- Pauli introduce principiul excluziunii.
- 1926 - Schrödinger publică prima sa lucrare despre mecanica undelor.
- Born publică prima sa lucrare despre interpretarea probabilistică a mecanii cuantice.
- Fermi publică prima sa lucrare despre statistica cuantică.
- 1927 - Heisenberg formulează principiul incertitudinii.
- 1928 - Dirac introduce ecuația relativistă a electronilor.
- 1929 - Murray Gell – Mann se naște la New York.
- Hubble publică prima lucrare despre relația liniară dintre viteza recesiunii galaxiilor și distanța lor față de Pământ.
- Dirac introduce teoria “golului”, identificând golul cu protonul.

- 1931 - Dirac propune existența antielectronului, numit mai târziu pozitron.
- John Cockcroft și Ernest Walton studiază reacțiile nucleare cu generarea razelor de protoni într-un accelerator liniar.
- 1933 - Einstein se mută la Princeton, New Jersey.
- Fermi publică lucrarea despre teoria descompunerii β .
- 1934 - Marie Curie moare la Sancellemoz, Franța.
- Chandrasekhar publică prima sa lucrare despre “piticele albe” (*white dwarf*).
- 1937 - Este decoperită particula numită mai târziu lepton μ .
- Rutherford moare la Cambridge, Anglia.
- 1938 - Meitner și Otto Frisch propun teoria fisiunii.
- 1939 - Bohr și Wheeler publică lucrarea despre mecanismul fisiunii.
- Robert Oppenheimer, George Volkoff și Richard Tolmann propun teoria stelelor neutronice.
- Oppenheimer și Hartland Snyder demonstrează că o implozie de stele idealizate formează o gaură neagră.
- 1941 - Nernst moare la Bad Muskau, Germania.
- 1942 - Fermi și asociații obțin susținerea primului lanț de reacții nucleare.
- Stephen Hawking se naște la Oxford, Anglia.
- 1943 - Laboratorul Național Los Alamos începe operațiunea de lângă Santa Fe, New Mexico.
- 1945 - Testul Trinity al bombei cu plutoniu lângă Alamogordo, New Mexico.
- 1946 - Sunt descoperite primele două particule „V”.
- George Gamow propune teoria preliminară a Big-Bang-ului.
- 1947 - Planck moare la Gottingen, Germania.
- 1948 - R. Alpher, H. Bethe și Gamow extind teoria Big Bang-ului.

- 1953 - Hubble moare la San Marino, California.
- Gell-Mann propune principiul “straneității” în teoria particulelor.
- 1954 - Fermi moare la Chicago.
- 1955 - Einstein moare la Princeton.
- 1956 - Conservarea parității interacțiilor slabe este cercetată de Tsung Dao Lee și Chen Nin Yang.
- Este detectată neutralitatea electronului.
- 1958 - Pauli moare la Zurich, Elveția.
- 1961 - Schrodinger moare la Alpbach, Austria.
- Gell-Mann propune simetria $S(3)$ pentru structura hadronică.
- 1962 - Bohr moare la Copenhaga.
- Este detectat neutrino tip μ .
- 1964 - Particula Ω^- este descoperită.
- Gell-Mann propune modelul quark cu trei “arome” (*flavours*).
- Este introdusă o a patra aromă de quark, denumită “șarm” (*charm*).
- Roger Penrose demonstrează ca găurile negre trebuie să conțină singularități.
- 1965 - Conceptul de “culoare” este introdus în fizica particulelor.
- 1967 - Wheeler introduce termenul de „gaură neagră”.
- 1968 - Meitner moare la Cambridge, Anglia.
- 1969 - Hawking și Penrose demonstrează că universul a început într-o singularitate.
- 1972 - Feynman propune modelul partonului.
- 1973 - Se propune teoria libertății asimptotice și a confinării quarcilor.
- 1974 - Descoperirea particulei J/ψ .
- Se găsește experimental șarmul quark-ului.
- 1975 - Leptonul τ este detectat.

- 1976 - Heisenberg moare la Munich, Germania.
- 1977 - Se raportează dovezi experimentale asupra quark-ului inferior (*bottom*).
- 1979 - Sunt raportate dovezi experimentale asupra gluonilor.
- 1984 - Dirac moare la Miami, Florida.
- 1987 - De Broglie moare la Paris.
- 1988 - Feynman moare la Los Angeles, California.
- 1989 - Se prezintă dovezi experimentale pentru existența a numai trei generații de quark și lepton.
- 1995 - Se prezintă dovezi experimentale pentru existența quark-ului superior (*top*).
 - Chandrasekhar moare la Chicago.
- 2000 - Neutrino tip τ este detectat.

FORMULE ȘI TABELE DE MĂRIMI FIZICE

Mărimea	Simbolul	Dimensiunile
Accelerația	\vec{a}	LT^{-2}
Accelerația unghiulară	$\vec{\alpha}$	T^{-2}
Deplasarea unghiulară	θ	—
Frecvența și viteza unghiulară	ω	T^{-1}
Moment cinetic	\vec{L}	ML^2T^{-1}
Viteza unghiulară	$\vec{\omega}$	T^{-1}
Aria (suprafața)	A, S	L^2
Deplasarea (distanța)	\vec{r}, \vec{d}	L
Energia totală, cinetică, potențială	E, E_c, E_p	ML^2T^{-2}
Forța	\vec{F}	MLT^{-2}
Frecvența	ν	T^{-1}
Câmpul gravitațional	\vec{g}	LT^{-2}
Potențialul gravitațional	V	L^2T^{-2}
Lungimea	l	L
Masa	m	M
Densitatea (de masă)	ρ	ML^{-3}
Impulsul	\vec{p}	MLT^{-1}
Perioada	T	T
Puterea	P	ML^2T^{-3}
Presiunea	p	$ML^{-1}T^{-2}$
Momentul de inerție	I	ML^2
Timpul	t	T
Momentul forței	\vec{M}	ML^2T^{-2}
Viteza	\vec{v}	LT^{-1}
Volumul	V	L^3

Lungimea de undă	λ	L
Lucrul mecanic	W / L	ML^2T^{-2}
Entropia	S	ML^2T^{-2}
Energia internă	U	ML^2T^{-2}
Căldura	Q	ML^2T^{-2}
Temperatura absolută	T	—
Capacitatea	C	$M^{-1}L^{-2}T^4I^2$
Sarcina	q, Q	TI
Conductivitatea	σ	$M^{-1}L^{-3}T^3I^2$
Curentul	i, I	I
Densitatea de curent	\vec{j}	$L^{-2}I$
Momentul dipolar electric	\vec{p}	LTI
Deplasarea electrică	\vec{D}	$L^{-2}TI$
Polarizarea electrică	\vec{P}	$L^{-2}TI$
Câmpul electric	\vec{E}	$MLT^{-3}I^{-1}$
Fluxul electric	Φ_E	$ML^3T^{-3}I^{-1}$
Potențialul electric	V	$ML^2T^{-3}I^{-1}$
Tensiunea electrică	\mathbf{E}	$ML^2T^{-3}I^{-1}$
Inductanța	L	$ML^2T^{-2}I^{-2}$
Momentul dipolar magnetic	$\vec{\mu}$	L^2I
Câmpul magnetic	\vec{H}	$L^{-1}I$
Fluxul magnetic	Φ_B	$ML^2T^{-2}I^{-1}$
Inducția magnetică	\vec{B}	$MT^{-2}I^{-1}$
Magnetizarea	\vec{M}	$L^{-1}I$
Permeabilitatea	μ	$MLT^{-2}I^{-2}$
Permitivitatea	s	$M^{-1}L^{-3}T^4I^2$
Rezistența	R	$ML^2T^{-3}I^{-2}$
Rezistivitatea	ρ	$ML^3T^{-3}I^{-2}$
Tensiunea (căderea de tensiune, diferența de potențial)	U	$ML^2T^{-3}I^{-1}$

CONSTANTE FUNDAMENTALE ȘI DERIVATE

Denumirea	Simbolul	Valoarea de calcul
Viteza luminii	c	$3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$
Permeabilitatea magnetică a vidului	μ_0	$1,26 \times 10^{-6} \text{ H/m}$
Permitivitatea electrică a vidului	ϵ_0	$8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
Sarcina elementară	e	$1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$
Numărul lui Avogadro	N_0	$6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Masa de repaus a electronului	m_e / Me	$9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Masa de repaus a protonului	m_p / Mp	$1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Masa de repaus a neutronului	m_n / Mn	$1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Constanta lui Planck	h	$6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
Raportul: sarcina / masa electronului	e / m_e	$1,76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$
Raportul: constanta Planck/sarcina elementară	h / e	$4,14 \times 10^{-15} \text{ J} \cdot \text{s/C}$
Lungimea de undă Compton a electronului	λ_e	$2,43 \times 10^{-12} \text{ m}$
Constanta Rydberg	R_∞	$1,10 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$
Raza Bohr	a_0	$5,29 \times 10^{-11} \text{ m}$
Magnetonul Bohr	μ_B	$9,27 \times 10^{-24} \text{ J/T}$
Magnetonul nuclear	μ_N	$5,05 \times 10^{-27} \text{ J/T}$
Momentul magnetic al protonului	μ_p	$1,41 \times 10^{-26} \text{ J/T}$
Constanta universală a gazelor	R	$8,31 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$
Volumul molar al gazului ideal în condiții normale	V_0	$2,24 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{mol}$
Constanta lui Boltzmann	k	$1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
Constanta lui Stefan-Boltzmann	σ	$5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$
Constanta gravitațională	G	$6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$

BIBLIOGRAFIE

1. BERKELEY – *Cursul de Fizică*, Editura Didactică și Pedagogică, 1981
2. EL. BISTRICEANU – *Introducere în electronică I*, Matrix Rom, 1996.
3. SEAN CARROLL – *The particle at the End of the Universe*, Oneworld, UK, 2012
4. WILLIAM H. CROPPER – *Great Physicists*, Oxford University Press, 2004
5. RICHARD FEYNMAN – *Fizica modernă*, Editura Tehnică, București, 1970
6. PATRICK HAMILL – *Lagrangians and Hamiltonians*, Cambridge University Press, USA, 2014
7. J. KANE, M. STERNHEIM – *Physique*, Dunod, 2004
8. L. D. KIRKPATRICK, G. F. WHEELER – *Physics, a world new*, Sounders, Coll. Publ., 1992
9. A.KITAIGORDSKY – *Introduction to Physics*, Mir, 1981
10. N. I. KOȘCHIN, M. G. SHIRKEVICI – *Handbook of elementary physics*, Mir, 1977
11. L.D. LANDAU, E.M. LIFȘITZ – *Quantum Mechanics*, Butterworth-Heinemann, London, 2004
12. IURI MANIN – *Mathematics and Physics*, Birkhäuser, 1981
13. C. MANTEA, MIHAELA GARABET – *Fizică, clasa a XI-a*, ALL, 2006
14. J. MERILL, K. HAMBLIN, J. M. THORNE – *Physical science fundamentals*, Macmillan, 1982

15. DIDONA NICULESCU – *Fizică: Sinteze și
Complemente*, Ed. Național, 2009
16. A. PETRESCU, A. GHIȚĂ, A. STERIAN – *Fizică,
clasa a XII-a*, ALL, 2007
17. M. SCHWARZ – *Standard Model and Quantum Field
Theory*, Cambridge University Press, USA, 2004
18. O. P. SPIRIDONOV – *Universal Physical Constants*,
Mir, 1986
19. RODICA SPOIALĂ – *Ne place fizica?*, Ed. ALL, 1998.
20. S. TALPARARU, D. HARALAMB – *Fizica, manual pt.
clasa a X - a*, Editura Polirom, 2000-2003

INDICE DE NUME ȘI DE NOTAȚII

A

a da un vector **I.22**
absorbție **II.100**, *II.233*
acelerație **I.47**, *III.12*, *III.16*
acelerație medie **I.41**
accelerator **III.106**
acomodare **II.128**
acțiune directă **II.11**
acțiune la distanță **II.11**
acumulator electric **II.46**
acumulator **II.45**
adiabatic **I.132**
admitanță **II.87**
admisia, **II.173**
alunecare **I.55**
amortizat **II.156**
amper **II.24**
amplitudine **II.147**, *II.238*
amplitudine instantanee **II.156**
amu **III.64**
analiză spectrală **III.33**
anion **II.44**
antena **II.189**
antiparticulă **III.104**
ardere externă **I.172**
ardere internă **I.172**
armătură **II.34**, *II.209*

armonică fundamentală **II.162**
armonicele coardei **II.162**
ascensională arhimedică **I.110**
autoinducție **II.71**
axă **I.19**
axă optică **II.114**
axiomă a staticii **I.85**

B

barion **III.104**
bătaie **II.164**
baterie electrică **II.46**
bandă spectrală **III.77**
birefringență **II.194**
boson **III.104**, *III.149*
braț al forței **I.98**
busolă **II.58**

C

cadru de curent **II.61**
calorie **I.147**
calorimetru **I.147**
calorimetrie **I.145**
cantitate de electricitate **II.23**
capacitate **II.210**
capacitate electrică **II.34**
capacitate calorică **I.145**
capacitor **II.34**, *II.209*
catodic **III.46**

cation **II.44**
cădere **I.207**
căldură de ardere **I.254**
căldură latentă de condensare **I.163**
căldură latentă de topire **I.160**
căldură latentă de vaporizare **I.163**
căldură molară **I.152**
căldură specifică **I.146**
câmp **II.11**, *III.149*
câmp electric **II.17**
câmp electrostatic **II.16**
câmp gravitațional **I.26**, *II.12*
câmp magnetic **II.60**
câmp scalar **II.12**
câmp vectorial **II.11**
celulă galvanică **II.45**
centrală termică nucleară **III.99**
centripetă **I.48**
centru de greutate **I.103**
ciclic **I.167**
ciclu termodinamic **I.132**
ciocniri **I.83**
ciocniri elastic **I.83**
ciocniri plastic **I.83**
cinetică **I.72**
circuit **II.25**
circuit de curent alternativ **II.75**
circuit electric **II.25**
circuit oscilant **II.182**

circular uniform **I.47**
coeficient de frecare **I.55**
coeficient de performanță **I.169**
coerentă **III.95**
colector **II.96**, *II.221*
combustibil **I.147**
componentă scalară **I.31**
compus chimic **III.139**
concav **II.113**
condensare **I.163**
condensator **I.167**, *II.209*
condensator electric **II.34**
condiție de echilibru **II.102**
conductanță **II.29**
conducție **I.249**, *II.194*
conductor **II.22**, *II.194*
conservare în timp **I.75**
conservativ **I.76**, *II.19*
constantă de dezintegrare **III.91**
constantă de elasticitate **I.53**
constantă dielectrică **II.210**
constanta gazelor ideale **I.135**
constantă magnetică **II.66**
constanta Planck a acțiunii **III.35**
constanta Planck redusă **III.57**
constantă radiativă a corpului negru **II.196**
contact direct **I.53**
contractia lungimii **III.118**
contur **II.53**

conul luminii **III.13**
conul viitorului **III.13**
convecție **I.249**, *II.194*
convergent **II.119**
convex **II.113**
coordonate carteziene **I.31**
cornee **II.128**
corp negru **II.194**, *II.233*
coulomb **II.14**
creștere **I.34**, *II.241*
cristalin **II.128**
cuante **III.36**, *III.119*
cuantice **III.72**
cuplu de forțe **I.91**
curcubeu **II.180**
curent alternativ **II.23**
curent continuu **II.23**
curent de deplasare **II.185**
curent de inducție **II.69**
curent de întrerupere **II.63**
curent efectiv **II.76**
curent electric **II.22**
curent **II.23**, *II.24*, *II.75*
curent indus **II.69**

D

datare cu o cantitate de carbon radioactiv **III.93**
defazaj **II.83**
defazat **II.147**

defect de masă **III.86**
densitate **I.52**
densitate curent **II.186**
densitate de volum **I.104**
densitate liniară **I.104**
densitate superficială **I.104**
desublimare **I.165**
deuteriu **III.49**
dezintegrare α **III.89**
dezintegrare β **III.90**
diferență de fază **II.147**
difracție **II.100**
dilatarea timpului **III.118**
dinamometru **I.53**
dioptru **II.103**
dipol **II.26**
disociere electrolitică **II.44**
distanță focală obiect **II.107**
distanță focală-imagine **II.106**
distilare **I.163**
divergent **II.119**
doză de iradiere **III.95**
drum parcurs **I.188**
durată de înjumătățire **III.92**
durată medie τ de viață **III.105**

E

echilibru **I.101**, *I.131*
eclipse **II.139**

ecuație **I.33**
ecuație calorimetrică **I.147**
ecuația gazului ideal **I.135**; *I.136*
ecuația lui Schrödinger **III.56**
ecuația undelor armonice plane **II.160**
ecuația undelor **II.161**
ecuație de stare **I.133**, *I.235*
ecuație diferențială **II.149**
ecuație parametrică **I.45**
efectuare de lucru **I.150**
efect fotoelectric extern **III.37**
efect fotovoltic **III.43**
efect magnetic al curentului electric **II.58**
eficiență **I.169**
efort longitudinal **I.206**
efort unitar **I.54**
electrochimie **II.43**
electrod **II.44**
electrolit **II.44**
electroliză **II.44**, *II.45*
electromagnet **II.61**
electromotor **II.95**
electron **II.206**, *III.47*, *III.49*
electronvolt **II.47**, *III.64*
element chimic **III.62**, *III.123*, *III.139*
element de arc **I.189**
energetică nucleară **III.102**
energie **I.72**
energie cinetică **I.73**

energie cinetică medie **I.127**
energie cinetică relativistă **III.22**
energie de legătură **III.85**
energie de repaus **III.17, III.23**
energie internă **I.150**
energie potențială **I.74**
energie totală **I.73, I.76**
eveniment spațio-temporal **III.12, III.116**
explozie **I.172**
expresie analitică **I.32**

E

f.e.m. de autoinducție **II.71**
factor de putere **II.88, II.181**
farad **II.35, II.210**
fascicul coerent **III.97**
fază inițială **II.147**
faza undei **II.160**
fenomene atomice și subatomice/ nucleare **III.61**
fermion **III.104**
fierbere **I.130**
figuri Lissajoux **II.249**
fisiune **III.103, III.129**
fisiune nucleară **III.98**
fizic conectabil **III.13,**
fizică atomică **III.61**
fizică nucleară **III.61, III.81**
flash **III.12**
flux magnetic **II.67**

flux radiativ **II.195**
 focar–imagine **II.107**
 focar–obiect **II.107**
 formulă a lui Boltzmann **I.127**
 formulă barometrică **I.106**
 formula lui Galilei **II.151**
 formula lui Hertz–Thomson **II.84, II.184**
 formula lui Leibniz – Newton **I.37**
 formula lui Rydberg **III.70**
 formula opticienilor **II.125**
 formulele lentilelor subțiri **II.121**
 formulele oglinzii concave **II.115, II.116**
 forță **I.49, III.131**
 forță electromagnetică **II.67, III.108**
 forță electromotoare **II.26**
 forță magnetică **II.63**
 forță de frecare **I.55**
 forță de interacțiune **II.15**
 forță elastică **I.53**
 forță nucleară **III.87**
 forțe nucleare slabe **III.109, III.149**
 forțe nucleare tari **III.109, III.148**
 fotocatod **II.235**
 foton **III.39, III. 104, III.149**
 frecvența **II.146, II.158, II.238**
 frecvență circulară **II.147, II.158**
 frontierele aplicabilității legilor opticii geometrice **II.226**
 funcție de densitate **III.57**
 funcționarea ochiului **II.128**

fuziune **III.103**, *III.129*
fuziune nucleară **III.101**
fuziune termonucleară **III.101**

G

galileian **III.112**
gaz real **I.138**
gaz ideal **I.135**
gluon **III.149**
gravitație **III.109**
greutate **I.58**
grup Galilei **III.30**
grup Lorentz **III.30**

H

hadron **III.105**
hipermetrop **II.129**

I

ideal **I.116**
identitatea lui Lagrange **I.30**
imagine **II.111**
imagini reale **II.127**
imagini virtuale **II.111**, *II.127*
impedanță **II.86**
impedanța circuitului **II.82**
impuls relativist **III.21**
impulsul unei forțe **I.78**
impulsul unui corp **I.78**

înălțimea sunetului **II.166**
incertitudine **III.56**
indice de refracție **II.100**
indice adiabatic **I.157**
inductanță **II.72**
inducție **II.218**
inducție magnetică **II.60**
inducție electromagnetică **II.69**
inerțial **I.50, III.14**
inerție **I.50**
infrasonet **II.165**
injecție **I.172**
instalație frigorifică **I.168**
integrala lui f **I.36**
intensitate **II.166**
intensitatea câmpului electrostatic **II.22**
intensitate instantanee **II.24**
intensitate medie **II.24**
interacțiune nucleară slabă **III.148**
interacțiune tare **III.126**
intrinsec **III.68**
ion **II.44, II.206, III.63**
ionizare **II.46, III.63**
izobar **I.132, I.140, III.84**
izocor **I.132; I.140**
izolat **I.131**
izomer **III.84**
izoterm **I.132**
izoton **III.83**

izotop **III.50**, *III.83*

L

legea autoinducției **II.72**

legea Biot–Savart–Laplace **II.66**

legea conservării energiei **I.214**

legea Clapeyron Mendeleev **I.135**

legea lui Faraday **II.45**, *II.69*

legea lui Hooke **I.54**, *I.205*

legea lui Joule-Lenz **II.70**

legea lui Lorenz **II.64**

legea lui Ohm **II.28**, *II.83*

legea pârghiilor **I.90**

lentilă **II.118**

lepton **III.104**

linie de forță **II.13**

linie spectrală **III.77**

linie de câmp **II.13**

linii spectrale ale atomilor **III.78**

lucru mecanic **I.66**

lucru mecanic elementar **II.18**

lumină vizibilă **II.192**

lunetă Kepler **II.137**

lungime de undă Compton **III.55**

lungime de undă **II.158**, *II.241*

lupă **II.133**

M

manometru **I.113**

mărime rezultantă **I.30**
mărire liniară prin dioptru **II.108**
masă **I.37**, *I.52*, *III.148*
masă critică **III.99**
masă molară **I.121**
masă moleculară **I.122**
mașină termică **I.167**
măsură **I.20**
medie pătratică **II.75**
mezon **III.104**
microundă **II.191**, *III.97*
mișcare curbilinie **I.45**
mișcare termică **I.126**
mișcare armonică **II.147**
mișcare în fază **II.173**
mișcare browniană **I.129**
mobil **I.187**
model cuantic **III.66**
modelul lui Dalton **III.65**
modelul lui Thomson **III.65**
modulul lui Young **I.54**, *I.205*
mol **I.120**, *I.229*
moment **I.78**
moment cinetic de spin **III.72**
moment de răsturnare **I. 100**
moment rezultant **I.99**
moment unei forțe **I.98**
motoare în 2 timpi **I.172**
motoare în 4 timpi **I.172**

motor electric **II.95**

motor termic **I.167**

N

negativ **II.14**

neutron **III.48, III.81**

nivel de intensitate **II.168**

nivel de referință **II.167**

nod **II.53, II.160**

nucleon **III.81**

nucleu **III.81**

nucleu magic **III.84**

nuclid **III.83**

număr atomic **III.49, III.139**

număr cuantic **III.72**

număr de masă **III.49, III.139**

număr de ordine **III.49**

număr de undă **II.160**

număr de decibeli **II.168**

numărul lui Avogadro **I.120**

O

obiectiv **II.135**

observabil **III.51**

ochelari **II.129**

ochi miop **II.129**

ochi prezbit **II.129**

ocular **II.135**

octavă **II.247**

oglină **II.110**, *II.229*
oglină cilindrică **II.118**
oglină parabolică **II.118**
ohm **II.28**
omogen **I.103**
optică **II.99**
optică geometrică **II.99**
optică ondulatorie **II.99**
optică electronică **II.100**
opus **I.23**
orbital **III.74**, *III 141*
oscilație **II.146**
oscilație armonică **II.146**
oscilație electrică **II.181**
oscilație forțată **II.155**
oscilație libere **II.155**
oscilație periodică **II.146**
oscilator **II.182**

P

(în) paralel **II.50**
parametru de stare **I.131**
pârghie **I.92**
particulă **II.100**
particulă elementară **III.104**
pendul de torsiune **II.150**
pendul fizic **II.148**
pendul matematic **I.96**, *II.148*
penumbră **II.139**

perie colectoare **II.221**
perioadă **II.146**, *II.158*, *II.238*
perioadă principală **II.146**
permeabilitate a vidului **II.66**
pilă de combustie **II.46**
pion **III.88**
pixel **II.131**
plan de polarizare **II.193**
plan de vibrație **II.193**
plasmă **II.47**
pol **II.58**
polarizare **II.193**
polarizat liniar **II.193**
politerm **I.181**
polul Nord Magnetic **II.62**
pompă de căldură **I.169**
potential **I.72**
potențial electric **II.20**
potențialul electrochimic al electrodului **II.45**
potențialul newtonian **II.12**
pozitiv **II.14**
pozitron **III.63**
prag minim de audibilitate **II.167**
presiune **I.65**, *I.127*, *I.206*
presiune normală **I.113**
prima rază a lui Bohr **III.69**
prima viteză cosmică **I.63**
primitivă **I.37**
principiu **I.85**, *I.245*

principiul „acțio–reacțio” **I.52**
principiul filozofic al lui Le Chatelier **II.70**
principiul inerției **I.50**
principiul lui Huygens **II.173**
problema stabilității atomilor **III.50**
proces izobar **I.152**
proces izoterm **I.140**
proces izocor **I.152**
proces termodinamic **I.131**
proces politrop **I.158**
produs vectorial **I.28**
produs scalar **I.27**
progresiv **II.161**
proprietăți ale forțelor nucleare **III.87**
proprietăți principale ale produsului **I.29**
proton **III.48**, *III.81*
punct – imagine **II.103**, *II.114*
punct – obiect **II.103**
punct de condensare **I.163**
punct de rouă **I.145**
punct de vaporizare **I.163**
punct triplu **I.166**
putere **I.69**, *II.51*
putere activă **II.88**
putere aparentă **II.88**
putere calorifică **I.147**
putere consumată **II.39**
putere instantanee **II.77**
putere a lupei **II.133**

putere medie **II.77**
putere reactivă **II.88**

Q

quarc **III.83**

R

radiație infraroșie **II.191**
radiație γ **III.90**
radiație **II.194**
radiație termică **II.194**
radiație ultravioletă **II.191**
radiator **I.167**
radical **I.21**
radioactivitate artificială **III.89, III.144**
radioactivitate naturală **III.89, III.144**
ramură **II.53**
randament **I.71, I.167**
randamentul unui plan înclinat **I.71**
raport de compresie **I.174**
rată medie **I.34**
rază gamma **II.191**
rază X **II.191**
reactanță capacitivă **II.80**
reactanță inductivă **II.80**
reacție nucleară **III.97**
reactor nuclear **III.99**
reazem în consolă **I.96**
reflexie **II.100**

reflexie totală **II.109**
refracție **II.100**
refracție atmosferică **II.143**
regulă de cuantificare **III.67**
regimul termic permanent **II.215**
relația lui Gauss – Abbe **II.105**
relația lui Mayer **I.153**
relația lui Clausius **I.181**
relație de transformare **III.15**
relativitate restrânsă **III.17**
rețea electrică **II.25**
retină **II.128**
rezistență **II.28**
rezistivitate **II.32**
rezonanță **II.83, II.156**
rotor **II.96, II.221**

S

sarcină electrică **II.14, III.148**
scalar **I.24, I.40**
schimb de căldură **I.150**
scurtcircuit **II.30, II.209**
segment **I.20**
senzație sonoră **II.165**
(în) serie **II.47**
siemens **II.87**
sistem **I.130**
sistem de referință **III.111**
sistem termodinamic **I.131**

solenoid **II.59**
solid **I.128**
solidificare **I.162**
solubilitate **I.130**
soluție **II.44**
spectru de emisie **III.45**, *III.77*
spectru de valori **III.76**
spectru de absorbție **III.45**, *III.78*
spectrul razelor X **II.80**
spin **III.68**, *III.72*, *III.104*
spinorial **I.40**
stabil **I.105**
stare **I.131**
stare gazoasă **I.127**
stare de cădere a corpului **I.210**
stare de magnetizare **II.62**
stare solidă **I.128**
statică **I.85**
staționare **II.161**
stator **II.96**, *II.221*
strat **III.73**
sublimare **I.165**
substanță **II.11**, *III.62*
substrat **III.73**
sumă **I.24**
sunet **II.165**
superconductibilitate **II.32**
suprafață echipotențială **II.20**, *II.21*
sursă de oscilații **II.157**

șunt **II.213**

T

tabel sintetic **I.158**

temperatură **I.127**

temperatură absolută **I.132**

tensiune **I.53**, *I.206*

tensiune de la borne **II.29**

tensiune efectivă **II.76**

tensiune electrică **II.20**

tensiune electromotoare **II.29**

tensiune interioară **II.29**

tensorial **I.40**

teorema cosinusului **I.29**

teoremă a condițiilor de echilibru **I.102**

teoremă a lui Varignon **I.99**

terestră **II.136**

timbru **II.166**

timp de funcționare **I.173**

tomograf **II.201**

ton simplu **II.166**

topire **I.160**

traietorie **I.46**

transformare **I.132**

transformare Galilei **III.15**

transformare adiabatice **I.157**

transformare izobare **I.155**

transformare izocore **I.153**

transformare izoterme **I.156**

transport energie electrică **II.91**

transuranian **III.84**

tranziție **I.132**

tritiu **III.50**

turbogenerator **II.71**

U

ultrasunet **II.165**

umbră **II.139**

umiditate relativă **I.144**

undă **II.60**, *II.100*, *II.145*, *II.157*, *III.56*

undă a lui de Broglie **III.52**

undă coerentă **I.174**

undă radio **II.191**

undă sonoră **II.165**

undă sinusoidală **II.158**

undă subsonică **II.165**

undă electromagnetică **II.188**

unghi **I.20**

unghi critic **II.109**

unghi de fază **II.147**

uniform **I.42**

uniform accelerat **I.43**

uniform decelerat **I.44**

unitate atomică de masă **III.64**

V

valori ale mărimilor caracteristice **III.68**

vapori saturați **I.144**

vaporizare **I.129**, *I.163*
variație de entropie **I.182**
variație a energiei cinetice **I.73**, *I.74*
variație **III.23**
vâscos **I.116**
vas comunicant **I.107**
vector–deplasare **I.188**
vector–deplasare infinitesimală **I.188**
vectorial **I.40**
vector de poziție **I.25**
vector–acclerație **I.47**
vector–viteză **I.47**
vector–viteză tangențială **I.49**
versor **I.23**
viteză de propagare **II.158**
viteză finită **II.244**
viteză instantanee **I.41**
viteză liniară **I.47**
viteză medie **I.40**
viteză unghiulară **I.47**
volatilitate **I.130**
voltaj de stopare **III.42**
volum molar **I.123**

W

watt **II.40**
weber **II.68**

